



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

“CIRCULACIÓN SUPERFICIAL SOBRE LA PLATAFORMA COSTERA DE
CAMPECHE-YUCATÁN”

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFIA COSTERA

PRESENTA:

NOÉ ARIAS MARTÍNEZ

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

2023

**FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
POSGRADO EN OCEANOGRAFIA COSTERA**

**“Circulación superficial sobre la plataforma costera de
Campeche-Yucatán”**

T E S I S

**QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA
OBTENER EL GRADO DE**

MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

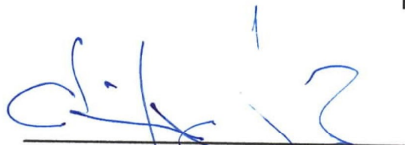
PRESENTA

NOE ARIAS MARTINEZ

Aprobada por:



Dr. Xavier Flores Vidal
Director de tesis



Dr. Adán Mejía Trejo
Sinodal



Dr. Ismael de Jesús Mariño Tapia
Sinodal



Dr. Napoleón Gudiño Elizondo
Sinodal



Dr. Jorge Alejandro Kurczyn Robledo
Sinodal

DEDICATORIA

A mis padres María y Noé, por su apoyo, confianza y cariño incondicional.

A mi hermana Itzel, por siempre estar a mi lado aún en la distancia.

A mis abuelas: Lupe (†) y Ana (†), por darme siempre su amor.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecerte a ti madre, por todo tu amor, cariño y apoyo en cada una de mis decisiones. Papá gracias por todos los consejos que me has brindado y por escucharme siempre.

A mi hermana Itzel, porque siempre estas para mi escuchándome y animándome.

A mi abuela Ana (†) por brindarme todo su cariño, y sobre todo a ti Lupe (†), tu perdida ha sido un golpe muy fuerte, pero agradezco todo el amor que me diste.

Al Dr. Xavier Flores, por todo el apoyo, enseñanzas, sugerencias, y oportunidades, pero, sobre todo, gracias por la gran paciencia.

A los miembros del comité de tesis, el Dr. Ismael Mariño, Dr. Adán Mejía, Dr. Napoleón Gudiño, y al Dr. Alejandro Kurczyn, por su paciencia, consejos y apoyo durante este trabajo.

A Marlén Ramos y Adalberto Rodríguez, por abrirme las puertas de su casa y hacerme sentir parte de ella. A ti Marlene por pasar todos estos momentos a mi lado y no dejarme rendir ante los problemas más grandes.

A mis profesores del posgrado, pero sobre todo al Dr. Héctor Nava, y al Dr. Reginaldo Durazo, quien me apoyó y despertó aún más el interés por la dinámica oceánica.

A mi amigo Isaí, por todos consejos que me has dado.

A mis amigos Joha y Lalo, gracias por apoyarme y forzarme a terminar este trabajo, les agradezco sus consejos y apoyos. También a mis amigos y personas que de una u otra manera me hayan apoyado durante la conclusión de la maestría.

Al CONACyT por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de posgrado.

Al Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC) de la UNAM, en particular al Dr. José López por las mediciones del ADCP frente a Sisal.

RESUMEN

La circulación costera en el oeste de la Península de Yucatán está fuertemente influenciada por el efecto de los vientos alisios y los “nortes”. Estudios previos han reportado que Yucatán es caracterizado por tener una plataforma somera, con una dirección de corrientes hacia el oeste influenciada por la corriente de Yucatán, mientras que en las costas de Campeche las corrientes se dirigen hacia el sur-suroeste al seguir las isóbatas. El presente estudio utiliza principalmente datos de corrientes marinas superficiales medidas con radares de alta frecuencia (HFR por sus siglas en inglés), con el fin de estudiar la variabilidad oceánica sobre la plataforma costera de Campeche-Yucatán durante el año 2019. Los HFR permitieron monitorear las corrientes desde la costa hasta ~220 km en mar abierto, con una resolución espacio-temporal de 3 km y 30 minutos respectivamente, el análisis se complementó con datos adicionales como los ADCPs, productos satelitales de altimetría, viento, temperatura superficial del mar, y un modelo oceánico de dominio público HYCOM. Los resultados frente a Yucatán sugieren una entrada de agua del Caribe a través de la surgencia de Cabo Catoche, la presencia de una corriente costera con dirección hacia el oeste-suroeste con velocidades (promedio anual) de $\sim 0.20 \text{ m s}^{-1}$, y frente a Sisal un remolino anticiclónico probablemente influenciado por los vientos alisios y las “suradas”. Al oeste de Sisal, se observó una bifurcación de las corrientes (hacia el noroeste y hacia el suroeste) durante la primavera y verano, misma que pareciera desvanecerse durante el invierno. En Campeche la circulación anual promedio fue de $\sim 0.10 \text{ m s}^{-1}$, donde se mostró la bifurcación de corrientes que sucede entre Sisal e Isla Arena que pudieran ser influencia de las corrientes de Yucatán y del cambio de dirección en la línea de costa, en la región central de Campeche las corrientes se dirigen hacia el sur-sureste que alude a un sistema de corrientes que “zigzaguea” siguiendo la forma de la línea de costa, mientras que en el sur de Campeche las corrientes se dirigen hacia el suroeste y siguen la línea de costa. De acuerdo a los resultados obtenidos, se sugiere que las corrientes superficiales de la zona están forzadas principalmente por el efecto del viento, y que existe cierta conectividad entre ambas regiones, que pueden estar asociadas a la bifurcación de corrientes en el límite occidental de Yucatán o a las respuestas inerciales ocasionadas por los vientos nortes. De esta manera el presente estudio complementa los conocimientos existentes sobre la parte oeste de la península de Yucatán, además de incluir el uso de herramientas nuevas como los radares de alta frecuencia.

Palabras clave: Península de Yucatán, Plataforma Costera Campeche-Yucatán, Radar de Alta Frecuencia (HFR), circulación superficial, eventos nortes.

ABSTRACT

Coastal circulation in the western Yucatan Peninsula is strongly influenced by the effect of the trade winds and northerlies. Previous studies have reported that the Yucatan is characterized by a shallow shelf, with a westward current direction influenced by the Yucatan current, while offshore of Campeche the currents are directed south-southwestward following the isobaths. The present study uses mainly surface ocean current data measured with high frequency radar (HFR), in order to study the oceanic variability over the Campeche-Yucatan coastal shelf during 2019. The HFRs allowed monitoring currents from the coast to ~220 km in the open ocean, with a spatio-temporal resolution of 3 km and 30 minutes respectively, the analysis was complemented with additional data such as ADCPs, satellite products of altimetry, wind, sea surface temperature, and a HYCOM public domain ocean model. The results off Yucatan suggest an inflow of water from the Caribbean through the Cabo Catoche upwelling, the presence of a west-southwesterly coastal current with velocities (annual average) of ~ 0.20 m s⁻¹, and off Sisal an anticyclonic eddy probably influenced by the trade winds and "suradas". West of Sisal, a bifurcation of currents (to the northwest and southwest) was observed during the spring and summer, which seemed to fade during the winter. In Campeche the average annual circulation was ~ 0.10 m s⁻¹, which showed the bifurcation of currents that occurs between Sisal and Isla Arena that could be influenced by the Yucatan currents and the change of direction in the coastline, in the central region of Campeche the currents are directed towards the south-southeast that alludes to a current system that "zigzags" following the shape of the coastline, while in the south of Campeche the currents are directed towards the southwest and follow the coastline. According to the results obtained, it is suggested that the surface currents in the area are forced mainly by the effect of the wind, and that there is some connectivity between both regions, which may be associated with the bifurcation of currents at the western boundary of Yucatan or with the inertial responses caused by northerly winds. In this way the present study complements the existing knowledge about the western part of the Yucatan Peninsula, besides including the use of new technologies such as high frequency radars.

Keywords: Yucatan Peninsula, Campeche-Yucatan Coastal Platform, High Frequency Radar (HFR), surface circulation, north wind events.

Índice de contenido

Capítulo 1. Introducción	1
1.2. Objetivos.....	5
1.2.1. Objetivo general	5
1.2.2. Objetivo particular.....	5
Capítulo 2. Datos y métodos	6
2.1. Radares de alta frecuencia (HFR)	6
2.1.1. Procesamiento de datos obtenidos con HFR.....	10
2.2. Productos adicionales.....	15
2.2.1. Altimetría satelital (SSH)	15
2.2.2. Temperatura superficial del mar (SST)	15
2.2.3. Modelo HYCOM.....	16
2.2.4. Mapas de viento.....	17
2.3. Datos <i>in-situ</i>	17
2.3.1. Derivadores superficiales.....	17
2.3.2. Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)	19
Capítulo 3. Resultados	21
3.1. Validaciones.....	21
3.1.1. ADCPs vs HFR.....	21
3.1.2. SSH vs HFR.....	30
3.1.3. HYCOM vs HFR.....	33
3.2. Descripción de la circulación superficial en la plataforma de Yucatán.....	37
3.2.1. Variabilidad anual.....	37
3.2.2. Variabilidad mensual.....	39
3.2.3. Circulación sub-mensual y eventos de corta duración.....	42
3.2.4. Circulación durante Nortes.....	45
3.3. Descripción de la circulación superficial en la plataforma Campeche.....	49
3.3.1. Variabilidad anual.....	49
3.3.2. Variabilidad mensual.....	50
3.3.3. Circulación sub-mensual y eventos de corta duración.....	54
3.3.4. Circulación durante Nortes.....	58
3.4. Circulación regional entre Campeche-Yucatán.....	61

Capítulo 4. Discusión	62
Capítulo 5. Conclusión.....	65
Literatura citada.....	68
Anexos.....	70

Lista de figuras

Figura

1. Plataforma continental de Campeche-Yucatán. El gradiente de colores indica la profundidad. Los números en color amarillo representan las isobatas de 500 a 3500 m de profundidad. La línea quebrada representa el límite occidental entre la plataforma costera Campeche-Yucatán (PCCY).....2
2. Porcentaje de cobertura espacial (contorno de color) de seis estaciones de radar HF del GoM durante el año 2019. En específico se muestran las estaciones que cubren la PCCY.....11
3. Espectro típico de un HFR en función del poder (ganancia) y la frecuencia. Figura modificada por Flores-Vidal et al. (2015) a partir de Paduan y Graber (1997).....12
4. Malla de GDOP estimada para las 6 estaciones de radar, asumiendo una cobertura constante de 180 km. Las elipses azules representan un error por geometría, ya que tienen una relación $>$ al 0.5 entre el semi eje mayor y el semi eje menor, se puede apreciar que estas se elongan hacia el eje que no pueden resolver. Las elipses rojas tienen una relación $<$ al 0.5 entre el semi eje mayor y el semi eje menor, lo que indica que sus componentes son casi ortogonales, por lo que son regiones donde es viable resolver las corrientes totales a partir de las corrientes radiales medidas por los HFR. Los puntos rojos en la costa indican la ubicación de los seis radares, Telchac (TEL), Sisal (SIS), Isla Arena (ISA), Champotón (CHA), Sabancuy (SAB) y Jalapita (JAL).....14
5. a) Esquema de los derivadores oceánicos DORIS. b) Esfera de flotación de DORIS con su panel solar interior y draga subsuperficial ubicada a 1 m de profundidad.....18
6. Mapa sinóptico de la dirección e intensidad de las corrientes superficiales medidas con los HFR, y las elipses de variabilidad con vectores de magnitud promedio de los HFR (color negro), y de los ADCPs de Lerma (color magenta), Champotón (color azul), y Chenkan (color amarillo), y la isobata de los 10 m de profundidad (línea punteada color verde)23
7. Series de tiempo para los datos de HFR (color rojo), y de los ADCPs (color azul). a) Datos de la componente zonal y b) meridional de Campeche. c) Datos de la componente zonal y d) meridional de Champotón. e) Datos de la componente zonal y f) meridional de Chenkan.....25 y 26
8. Mapa sinóptico frente a Sisal de la dirección e intensidad de las corrientes superficiales medidas con los HFR, y las elipses de variabilidad con vectores de magnitud promedio de los radares HF (color negro), y del ADCPs de Sisal (color magenta)29

9. Series de tiempo para los datos de HFR (color rojo), y del ADCP de Sisal (color azul). a) Datos de la componente zonal y b) meridional.....	30
10. Corrientes superficiales promedio obtenidas de SSH (color azul) y HFR (color negro) en el año 2019, las zonas de interés para Yucatán (punto verde) y Campeche (punto magenta). Se resalta la cobertura promedio de los HFR y la ubicación de los seis sitios de radar.....	31
11. Series de tiempo para los datos de SSH (color azul), y de los HFR (color rojo). a) Datos de la componente zonal y b) meridional de Yucatán, c) Datos de la componente zonal y d) meridional de Campeche.....	33
12. Corrientes superficiales promedio obtenidas del modelo HYCOM (color azul) y HFR (color negro) en el año 2019, las zonas de interés para Yucatán (punto verde) y Campeche (punto magenta). Se resalta la cobertura promedio de los HFR y la ubicación de los seis sitios de radar.	35
13. Series de tiempo para los datos del modelo HYCOM (color azul), y de los HFR (color rojo). a) Datos de la componente zonal y b) meridional de Yucatán, c) Datos de la componente zonal y d) meridional de Campeche.....	36
14. Corrientes superficiales promedio obtenidas de los HFR sobre las costas de Yucatán-Campeche con los vectores de dirección e intensidad (color negro), tres sitios del radar (puntos color rojo), la temperatura superficial obtenida de OSTIA (gradiente de color), y ubicación de la extracción de la serie de tiempo (punto color verde)	38
15. Climatología del 2019 en Yucatán, obtenidas de los radares de alta frecuencia, la dirección y magnitud de las corrientes superficiales están representadas por los vectores (color negro), y el punto rojo representa la zona de la extracción de la serie de tiempo (sitio de interés)	40
16. Series de tiempo de los datos de HFR (línea roja) y viento (línea azul) en Yucatán, a) componente zonal, y b) componente meridional.....	42
17. Serie de tiempo anual de la magnitud del viento (elevada a la tercera potencia) para Yucatán (color azul), la línea punteada color rojo representa el límite inferior de magnitud para clasificar los “nortes fuertes”, la línea punteada color magenta representa el límite inferior para clasificar los “nortes moderados”	43
18. Promedio de cinco días de la circulación superficial medida con los radares HF (representado por vectores negros), viento (vectores azules) y temperatura superficial (gradiente de color), en asteriscos se muestra la ubicación de la extracción de las series de tiempo (asterisco negro para los HFR y azul para el viento)	45

19. Serie de tiempo de la magnitud del viento (elevada a la tercera potencia) para Yucatán (color azul), y su dirección en grados (color gris), la línea de color rojo representa el límite inferior de magnitud para clasificar “nortes fuertes”, la línea punteada color magenta representa el límite inferior de la magnitud para clasificar los “nortes moderados”	46
20. Mapas sinópticos de las corrientes superficiales medidas de HFR (color negro) durante eventos de vientos nortes (color azul), así como la ubicación del ADCP de Sisal (color magenta) en diciembre de 2019. En la esquina inferior derecha se muestran las series de tiempo de las variables de viento (color azul), de los radares HF (color rojo) y del ADCP (color magenta)	48
21. Corrientes superficiales promedio obtenidas de los HFR sobre las costas de Campeche con los vectores de dirección e intensidad (color negro), dos sitios del radar (puntos color rojo), la temperatura superficial obtenida de OSTIA (gradiente de color), y ubicación de la extracción de la serie de tiempo (punto color verde)	50
22. Climatología del 2019 en Campeche, obtenidas de los radares de alta frecuencia, la dirección y magnitud de las corrientes superficiales están representadas por los vectores (color negro), y el punto rojo representa la zona de la extracción de las series de tiempo.....	52
23. Series de tiempo de los datos de HFR (línea roja) y viento (línea azul) en Campeche. a) componente zonal, y b) componente meridional.....	54
24. Series de tiempo anual de la magnitud del viento (elevada a la tercera potencia) para Campeche (color azul), la línea punteada color rojo representa el límite inferior de magnitud para clasificar los “nortes fuertes”, la línea punteada color magenta representa el límite inferior para clasificar los “nortes moderados”	55
25. Promedio de cinco días de la circulación superficial medida con los radares HF (representado por vectores negros), viento (vectores azules) y temperatura superficial (gradiente de color), en asteriscos se muestra la ubicación de la extracción de las series de tiempo (asterisco negro para los HFR y azul para el viento)	57
26. Serie de tiempo de la magnitud del viento (elevada a la tercera potencia) para Campeche (color azul), su dirección en grados (color gris), la línea de color rojo representa el límite inferior de magnitud para clasificar “nortes fuertes”, la línea punteada color magenta representa el límite inferior de la magnitud para clasificar los “nortes moderados”	58
27. Mapas sinópticos de las corrientes superficiales medidas de HFR (color negro) durante eventos de vientos nortes (color azul) durante diciembre de 2019, ubicación de la extracción de series de tiempo de ambas	

variables (punto color verde). En la esquina inferior derecha se muestran las series de tiempo de las variables de viento (color azul) y de HFR (color rojo)60

28. Trayectoria y vectores de velocidad medidas con DORIS (color azul) y velocidades de corrientes extraídas de la celda más cercana a la trayectoria de los HFR (color rojo), así mismo, el esquema de los vectores de velocidad medidas con los radares HF (color negro) promediados del 06 al 09, del 09 al 12 y del 12 al 16 de agosto del 2016, respectivamente, el recuadro (color negro) indica los datos promediados durante el análisis.....71

29. Series de tiempo del DORIS (color azul) y de los HFR (color rojo). a) Valores de la componente zonal, b) Valores de la componente meridional, y b) diagrama de astillas.....72

30. Plataforma continental de Campeche-Yucatán. El gradiente de colores indica la profundidad. Los números en color rojo representan las isobatas de 0 a 500 m de profundidad73

Lista de tablas

Tabla

1. Configuración básica de los radares utilizados en este trabajo.....9
2. Ubicación, tiempos de muestreo y profundidad para los sitios de ADCPs.....20
3. Coeficientes de correlación, valor P y diferencias de medición entre los ADCPs y HFR.....27

Capítulo 1. Introducción

El Golfo de México (GoM) es un mar semicerrado que se encuentra entre los litorales de México, Estados Unidos y Cuba, con una profundidad promedio de ~1600 m, y máxima de ~ 3700 m. Se comunica con el Mar Caribe a través del canal de Yucatán, ubicado entre la península de Yucatán y Cuba, con una profundidad máxima de 2000 m (Candela et al., 2019; Romero-Centeno et al., 2021).

El GoM se considera una cuenca de drenaje ya que presenta dos importantes sistemas fluviales que desembocan en él: el Río Mississippi al norte con descargas importantes principalmente en los meses de abril-mayo, y al sur el complejo del delta Usumacinta-Grijalva con aportes en la temporada de lluvias de septiembre-octubre. Debido a la variabilidad estacional influenciada por la fisiografía, hidrodinámica costera, geomorfología y meteorología, este mar contiene una gran diversidad de ecosistemas subtropicales y templados, ambientes costeros como estuarios, deltas, pantanos, manglares, arrecifes coralinos, y recursos biológicos que se desarrollan en una compleja trama trófica (Monreal y Salas, 2004).

Un forzamiento importante de la circulación en el GoM es la Corriente de Lazo (CL) y los remolinos que de ella se desprenden. La CL incursiona por el canal de Yucatán (conocida como Corriente de Yucatán), que penetra hacia el noroeste, y forma una especie de lazo en sentido anticiclónico que sale por el estrecho de Florida para formar parte de la corriente del Golfo. La CL evoluciona con el tiempo, aumenta su penetración hacia el noroeste hasta que se estrangula y forma un remolino anticiclónico (rotación en sentido horario) y se retrae hacia el sur, lo que favorece el flujo más directo entre el canal de Yucatán y el estrecho de Florida (Romero-Centeno et al., 2021).

La Plataforma Costera de Campeche-Yucatán (PCCY) se encuentra ubicada en la zona intertropical del GoM, dentro del Banco de Campeche (**Figura 1**), y está caracterizada por ser una plataforma somera, con una pendiente suave que va desde los ~200 m hasta los ~2500 m, la corriente que predomina en la zona es aparentemente influenciada por la Corriente de Yucatán, la cual presenta velocidades promedio de ~1.5 m s⁻¹ y máximas de 3 m s⁻¹ (Abascal et al., 2003; Cetina et al., 2006). Autores como Sheinbaum et al. (2002), Abascal et al. (2003) y Ruiz-Castillo et al.

(2016) han reportado en la Plataforma Costera de Campeche-Yucatán una componente hacia el oeste de la CY.

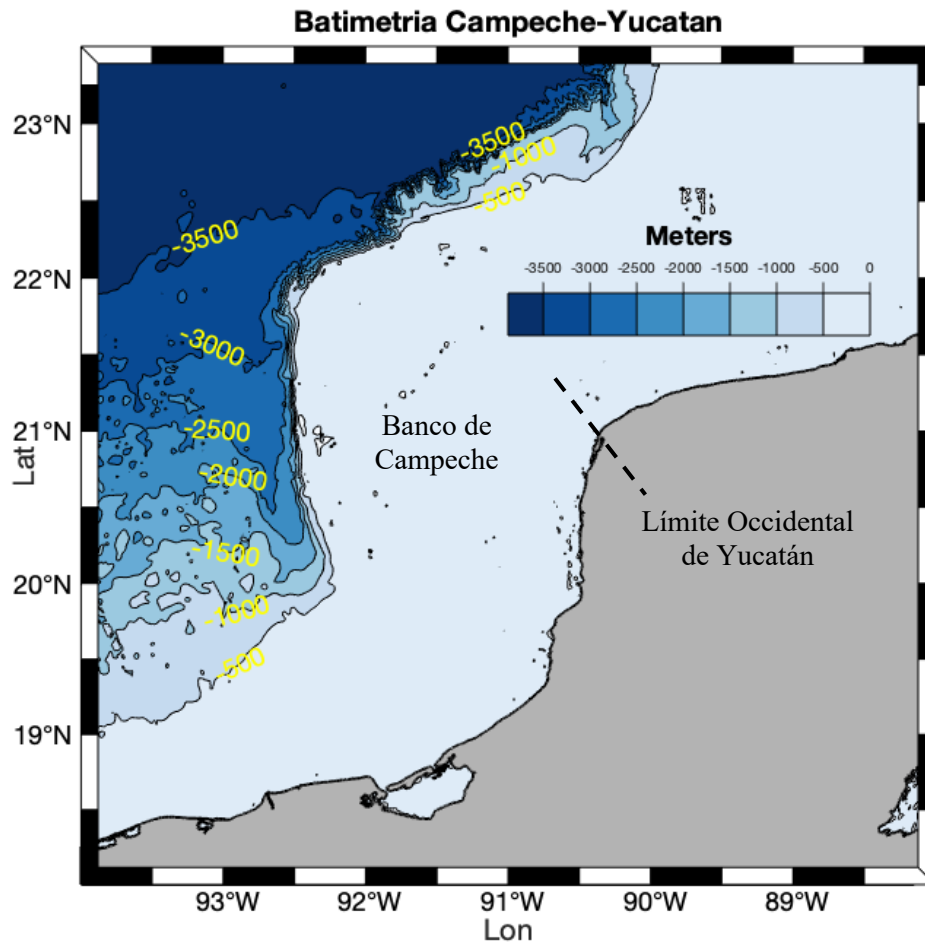


Figura 1. Plataforma continental de Campeche-Yucatán. El gradiente de colores indica la profundidad. Los números en color amarillo representan las isobatas de 500 a 3500 m de profundidad. La línea quebrada representa el límite occidental entre la plataforma costera Campeche-Yucatán (PCCY).

Parte de la complejidad que presenta el GoM es debido a forzamientos como el viento y el transporte asociado al flujo entrante desde el Mar Caribe, relacionados por el desplazamiento latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), con una franja de bajas presiones y lluvias situadas en el norte de su migración latitudinal sobre la región centroamericana durante los

meses de lluvia, y que se desplaza al sur durante la época seca de la región (Quirós e Hidalgo, 2016). La ZCIT se caracteriza por una presencia constante de los vientos Alisios (de componente este-oeste) que tienen una influencia sobre circulación en la capa superficial del mar principalmente en la dinámica, estratificación y variaciones estacionales de las masas de agua (Gordon, 1967; Castellanos et al., 2002). Otro forzamiento en la región, es el viento del noroeste, conocido localmente como “Nortes” y que típicamente se observan desde octubre hasta febrero (Enríquez et al., 2013), estos son vientos de mayor intensidad y durante periodos cortos, esto genera que la estratificación sea disminuida o completamente desvanecida (Tapanes, 1971; Merino, 1997; Ruiz-Castillo et al., 2016).

El viento muestra un efecto sobre las corrientes superficiales, ya que se crea un arrastre sobre el agua superficial y forma patrones de escala global, regional y local. En conjunto (viento y corrientes superficiales) definen la distribución de propiedades del agua, desde p.e. calor-temperatura, sal, pH, oxígeno, entre otras, hasta la distribución de sólidos en el agua (larvas, sargazo, etc.).

Las corrientes sobre el extremo norte (frente a Yucatán) de la PCCY tienen una dirección constante hacia el oeste (Jouanno et al., 2018; Ruiz-Castillo et al., 2016; Estrada-Allis et al., 2020; Kurczyn et al., 2021). Mientras que en el límite occidental de la PCCY (indicado en la **Figura 1**) se ha observado que las corrientes viran hacia el sur-suroeste, siguen las isobatas y dan lugar a una corriente costera hacia el suroeste que converge en las costas de Tabasco con las corrientes que viajan al sur desde Tamaulipas y Veracruz entre septiembre y marzo. Sin embargo, al día de hoy pocos estudios han utilizado mediciones directas (Enríquez et al., 2013; Reyes-Mendoza et al., 2016; Ruiz-Castillo et al., 2016; Kurczyn et al., 2020; Kurczyn et al., 2021) con instrumentos típicos como; CTD (Conductivity, Temperature, Depth, por sus siglas en inglés) lanzados desde cruceros oceanográficos que toman del orden de semanas a meses para producir un mapa sinóptico o Perfiladores Acústicos Doppler (ADCP, por sus siglas en inglés), ya sea instalados en anclajes que permiten tener una perspectiva Euleriana pero con una fuerte limitante sinóptica, o por el contrario a bordo de cruceros, lo cual refuerza la componente sinóptica pero tiene una fuerte limitante Euleriana.

La implementación y uso de modelos numéricos ha generado la mayor parte de la literatura existente que caracteriza la dinámica general del GoM, en particular los trabajos como: Martínez-López y Pares-Sierra (1998) en el que usaron un modelo que incluyó el corte de velocidad en la vertical, mediante el que fue posible representar el flujo de energía del viento hacia las capas inferiores, así como la influencia las corrientes producidas por el viento y la influencia de la Corriente de Yucatán sobre las corrientes de marea; Enríquez et al. (2010) utilizaron una versión 2-D del módulo de flujo del modelo numérico Delft3D, en el que estimaron la circulación y el resultado de la dispersión de un evento de marea roja sintético y conservativo frente a Cabo Catoche, en el cual incluyeron las corrientes inducidas por el viento y de gran escala (p.e. la Corriente de Yucatán); Jouanno et al. (2018) utilizó el modelo regional HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model), forzado en sus fronteras abiertas con salidas diarias del reanálisis global MERCATOR GLOR-YS2V3, lo que permitió la descripción de la variabilidad de las surgencias en el este de la Península de Yucatán, así como caracterizar sus forzamientos.

Por otro lado, Flores-Vidal et al. (2015) crearon una red de radares oceanográficos en el Golfo de México, que permitió muestreos sistemáticos y sinópticos, de las corrientes superficiales en el Golfo de México desde 2017 hasta el día de hoy. Los datos producidos por la red de radares en la región de la plataforma costera de Campeche-Yucatán, son mapas sinópticos horarios con resolución de 3 km y cobertura promedio de hasta 150 km de la costa, que brindan información sobre la circulación superficial en la región. Este trabajo, pretende mediante el estudio de los datos producidos por la red de radares HF del GoM, caracterizar la circulación superficial de la PCCY, así como realizar un aporte a la comprensión de la fenomenología oceánica en la región.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Caracterizar la variabilidad en escalas mensuales a estacionales, de las corrientes superficiales en la Plataforma Costera de Campeche-Yucatán (PCCY) a partir de radares de alta frecuencia y datos complementarios.

1.2.2. Objetivos particulares

- A partir de datos medidos con radares de alta frecuencia, se analizará la capacidad de reproducir la circulación de la capa superficial (~ 50 cm) oceánica en la región de interés, se compararán y validarán los resultados con datos adicionales provenientes de productos satelitales, simulaciones disponibles al dominio público, correntímetros anclados y boyas de deriva disponibles.
- Estudiar, comparar y contrastar los resultados encontrados en este trabajo con la literatura existente en la región.
- Reportar la dinámica sinóptica de la superficie oceánica en la región de la PCCY en escalas temporales mayores a la mensual.
- Evaluar el efecto de eventos de viento intenso como nortes y suradas, en escalas de algunos días.

Capítulo 2. Datos y métodos

Para la medición directa (*in-situ*) de las corrientes, existen dos técnicas importantes. La Euleriana que consiste en medir la velocidad de corriente en un punto fijo a través del tiempo, generalmente realizada con correntímetros o ADCP's anclados; y la técnica Lagrangeana, que mide las corrientes desde un objeto en desplazamiento con la parcela de agua. Para esta técnica se pueden utilizar derivadores o trazadores que derivan por acción directa de las corrientes (Niller y Paduan, 1995; Ulanski, 2012; Pendón, 2017; Romero, 2019).

Una herramienta novedosa para estudiar las corrientes superficiales en el océano son los Radio Escaterómetros Doppler o Radares de alta frecuencia (HFR, por sus siglas en inglés), mismos que permiten tener ambas perspectivas (Euleriana y Lagrangeana), de manera remota, estos obtienen mediciones sinópticas de corrientes superficiales (primeros 50 cm de la capa oceánica) con una resolución espacial de metros, y temporalidad de minutos (Saavedra-Matta, 2017).

En este trabajo se utilizó un set de datos producidos por la red de radares del Golfo de México (Flores-Vidal et al., 2015; Flores-Vidal y Garcia-Nava, 2022), productos satelitales de reanálisis y simulaciones numéricas disponibles al dominio público, así como datos de correntímetros anclados en la región (Kurczyn et al., 2020, 2021) y boyas de deriva autónomas, a continuación, se describen y detallan cada una de las bases de datos utilizadas.

2.1. Radares de Alta Frecuencia (HFR)

Los HFR transmiten una onda electromagnética continua con frecuencia f_{RF} y longitud de onda λ_{RF} , dicha señal se refleja de manera difusa (sin forma ni sentido) sobre las ondas gravitacionales de la superficie oceánica con longitudes de onda $\lambda_{océano} \neq \lambda_{RF}/2$. Mientras que las ondas gravitacionales con longitudes de onda $\lambda_{océano} = \lambda_{RF}/2$ son reflejadas de manera especular (con las mismas características y en una sola dirección) hacia su origen, a esto se le denomina como condición *Bragg* (*Bragg scatter*), interferencia constructiva o resonancia electromagnética. Es decir, la sobreposición de dos ondas (transmitida y la conductiva superficie oceánica) debido a sus

fases ocasiona que la señal (λ_{RF}) se refleje. La señal reflejada es recibida nuevamente por los radares HF y su información (amplitud y longitud) está ligada a la onda oceánica que la originó (Flores-Vidal et al., 2015).

Los HFR realizan un barrido de pulsos con distintas frecuencias (*chirp*) demodulado por osciladores ortogonales locales (senos y cosenos), que generan una resonancia en la superficie oceánica en forma compleja (amplitud y fase) en función de la distancia radial (alcance del radar). La resolución espacial de los radares se divide en resolución radial, que depende del ancho de banda del *chirp*, y de la resolución angular, que depende del número de antenas receptoras y su geometría. En otras palabras, la resolución radial está dada por:

$$R = \frac{c}{2 * Bw} \quad (1.1)$$

donde R es la resolución radial (m), c es la velocidad de la luz ($m s^{-1}$) y Bw es el ancho de banda (Hz) sobre el que se hace el *chirping*, y el factor 2 proviene de la señal que “va y viene”, es decir, dos veces el recorrido de cada celda (ancho de banda) (Gurgel et al., 1999; Flores-Vidal et al., 2015).

La velocidad de la corriente máxima que se puede obtener de los HFR corresponde a la frecuencia de Nyquist o a la propagación de los reflectores de una λ durante dos *chirps*. La resolución de velocidad corresponde a $\lambda\pi$ cambio de fase, a la propagación de los reflectores de una λ durante todo el periodo de mediciones, es decir:

$$v = \frac{\lambda}{n * t} = \frac{\lambda}{T} \quad (1.2a)$$

$$V = \frac{v}{n/2} = \frac{\lambda}{2 * t} \quad (1.2b)$$

donde v es la resolución de la velocidad de las corrientes, V es la máxima velocidad (Nyquist), n es el número de *chirps* (2048 típicamente), t es la duración individual de cada *chirp* (0.3 s típicamente), T es la duración total de la medición, y los valores típicos que se tienen de v y V son 0.02 y $20 m s^{-1}$, respectivamente (Flores-Vidal et al., 2015). Es importante recordar que estos valores son válidos solo para corrientes radiales y no para corrientes totales (**Tabla 1**).

La profundidad efectiva de la medición de los HFR depende del perfil vertical de la corriente y de la frecuencia del radar (longitud de la onda *Bragg*). Ha (1979) demostró que, para un perfil logarítmico de corriente, las mediciones del radar corresponden a una profundidad de 0.04λ , donde λ es la longitud de onda del océano o la mitad de la longitud de onda del radar, y para perfiles de corrientes lineales, validado frecuentemente para regiones influenciadas fuertemente por el efecto del viento, la profundidad de la medición es de 0.08λ (Fernández et al., 1997; Flores-Vidal et al., 2015). La **Tabla 1** muestra las características técnicas con las que fueron programadas cada una de las seis estaciones de radares HF sobre la PCCY utilizadas en este trabajo.

Tabla 1. Configuración básica de los radares utilizados en este trabajo.

Sitio	Telchac	Sisal	Isla Arena	Champotón	Sabancuy	Jalapita
Frecuencia central (MHz)	8.27	8.12	7.85	8.10	8.33	8.25
Frecuencia Bragg	0.293	0.290	0.285	0.290	0.294	0.293
Longitud de onda (metros)	36.25	36.92	38.21	37.03	36.01	36.36
Ancho de banda (KHz)	50	50	50	50	50	50
Resolución espacial (Km)	3	3	3	3	3	3
Resolución temporal (Hrs)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Tasa de muestreo (Hz)	3	3	3	3	3	3
Ensamblados (min)	15.36	15.36	15.36	15.36	15.36	15.36
Precisión de velocidad radial (cm s^{-1})	1.9	2	2.1	2	1.9	1.9
Max. Vel. Radial posible de detectar (cm s^{-1})	90	90	90	90	90	90
Superficie efectiva de la medición	1.45 m	1.48 m	1.53 m	1.48 m	1.44 m	1.45 m
Rango máximo durante mediciones (Km)	180	200	190	180	180	220
Promedio del rango (Km)	120	150	120	120	120	150

2.1.1. Procesamiento de datos obtenidos con HFR

En este trabajo se usaron datos de corrientes superficiales medidas con seis estaciones de HFR, dos en Yucatán (Telchac y Sisal), tres en Campeche (Isla Arena, Champotón y Sabancuy) y una en Tabasco (Jalapita). La **Figura 2**, muestra la ubicación de las seis estaciones y su porcentaje de cobertura espacial (gradiente de color) durante el periodo de mediciones (de enero a diciembre de 2019) utilizadas para este trabajo, y el círculo color rojo delimita 200 km de distancia del radar. Mediante la **Figura 2** y la **Tabla 1**, se puede apreciar que las seis estaciones de radar mantuvieron una cobertura espacial de mediciones con un alcance de entre 150-180 km de la costa, zona sobre la que fue posible extraer corrientes radiales.

Para la estimación de las corrientes radiales, se usó un método conocido como *direction finding* (DF) (Lipa y Barrick, 1983), el cual resuelve la dirección de arribo de la señal, basado en las fases independientes de cada antena receptora del radar HF. Dichas antenas estuvieron dispuestas en forma de un arreglo cuadrado con diagonal $\lambda/2$, a las series de tiempo obtenidas por cada antena receptora se les aplicó una descomposición de Fourier, con lo cual se obtuvo la amplitud y fase de la señal. De esta forma, con la fase independiente de cada antena receptora, se resolvió la dirección de arribo de la señal (DOA). Para cada DOA, se aplicó una segunda transformada de Fourier, pero ahora sobre el ancho de Banda del *Chirp*, y de esta forma se obtuvo un espectro Doppler para cada rango R y para cada DOA, con lo que se formó un espectro Doppler en 3D (R, DOA y tiempo o medición) del cual la máxima señal es inducida por las corrientes marinas y conocido como Bragg Line (desplazamiento Doppler de la máxima señal). Este desplazamiento Doppler es inducido por la velocidad de fase de las ondas gravitacionales, por lo que la corriente se puede estimar a partir de la diferencia entre el desfase Doppler y la velocidad teórica esperada para las ondas gravitacionales que generaron el espectro Doppler, de esta forma la medición de corriente superficial es independiente de la frecuencia de operación del radar (Lipa y Barrick, 1983; Gurgel et al., 1999).

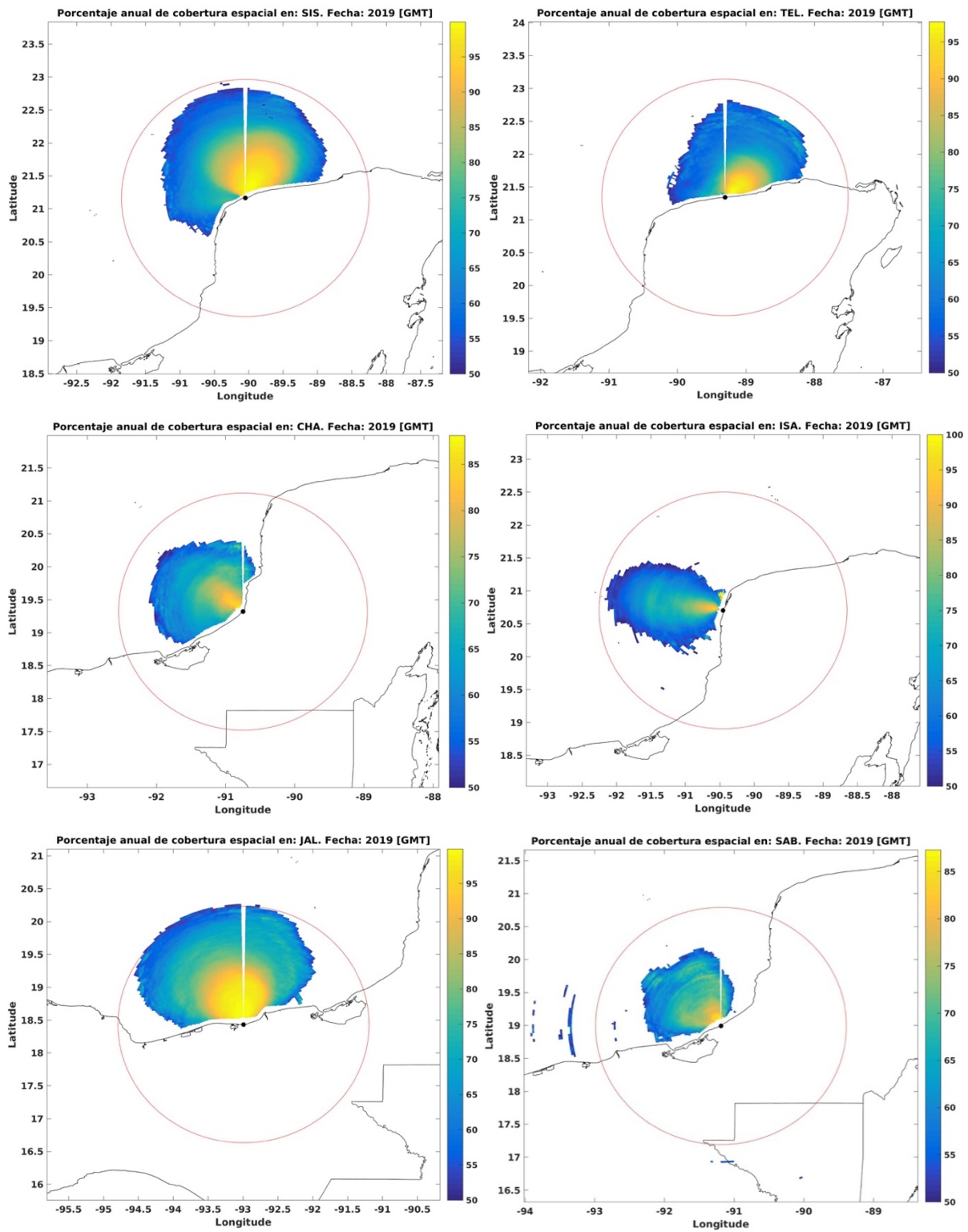


Figura 2. Porcentaje de cobertura espacial (contorno de color) de seis estaciones de radar HF del GoM durante el año 2019. En específico se muestran las estaciones que cubren la PCCY.

La **Figura 3** muestra un espectro Doppler característico de un radar HFR, las líneas quebradas verticales indican la posición teórica del desfase Doppler que tendrían las ondas gravitacionales lineales (si no existieran las corrientes) de la f_{Bragg} (ver **Tabla 1**). Los picos Bragg o Bragg lines de primer orden con desfases (Δf) positivos (negativos) indican ondas gravitacionales oceánicas acercándose (alejándose) del radar. Los picos Bragg de segundo orden contienen información del campo de oleaje. La línea diagonal punteada muestra la razón entre ambos picos Bragg de primer orden (positivo y negativo) e indica a su vez la razón de energía entre las corrientes acercándose y alejándose, lo que se puede asociar de forma directa con la dirección del viento relativa al HFR.

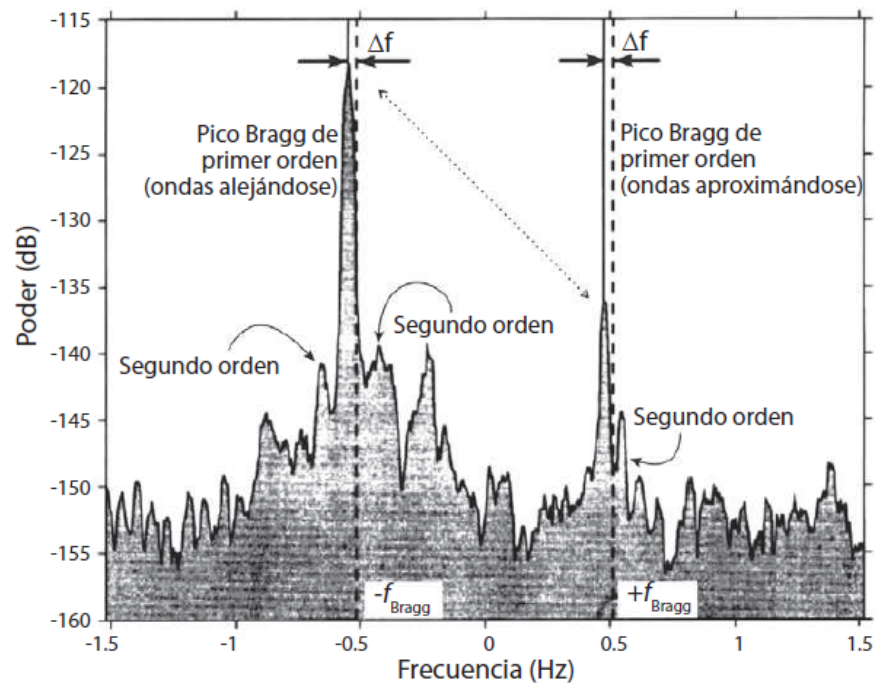


Figura 3. Espectro típico de un HFR en función del poder (ganancia) y la frecuencia. Figura modificada por Flores-Vidal et al. (2015) a partir de Paduan y Graber (1997).

Una vez que se tiene la dirección y magnitud de la corriente referida a cada estación de radar, se pueden producir mallas de corrientes radiales referidas al radar (que se acercan o se alejan del radar). Con al menos dos mallas radiales de corrientes, se pueden producir corrientes totales (componente zonal y meridional) sobre mallas cartesianas. Sin embargo, hay dos factores importantes a considerar para cuidar el control de calidad de las corrientes totales. Primero, debido a la orientación de las mallas radiales, existen restricciones geométricas conocidas como disolución geométrica de la precisión (GDOP, por sus siglas en inglés), el GDOP representa un indicativo de la calidad con que las corrientes totales se forman, ya que en regiones donde las mallas radiales carecen de ortogonalidad, habrá forzosamente una componente de la corriente total que no se podrá resolver.

La **Figura 4** muestra una malla de GDOP estimada para las 6 estaciones de radar utilizadas en este trabajo, y permite ver las zonas donde la estimación de corrientes totales sería deficiente (zonas en azul), es importante notar que el GDOP es una cantidad vectorial. Segundo, el GDOP depende además del número de estaciones activas, por lo que es un parámetro variable en tiempo, si una (o más) estaciones se “apagan”, el GDOP cambia. Tercero, dependiendo de las resoluciones de las mallas cartesianas y radiales, así como de la región sobre la cual exista un traslape entre mallas radiales, existe una mayor o menor cantidad de corrientes radiales disponibles para formar un vector de corriente total, por lo que ese número es fundamental para complementar el control de calidad.

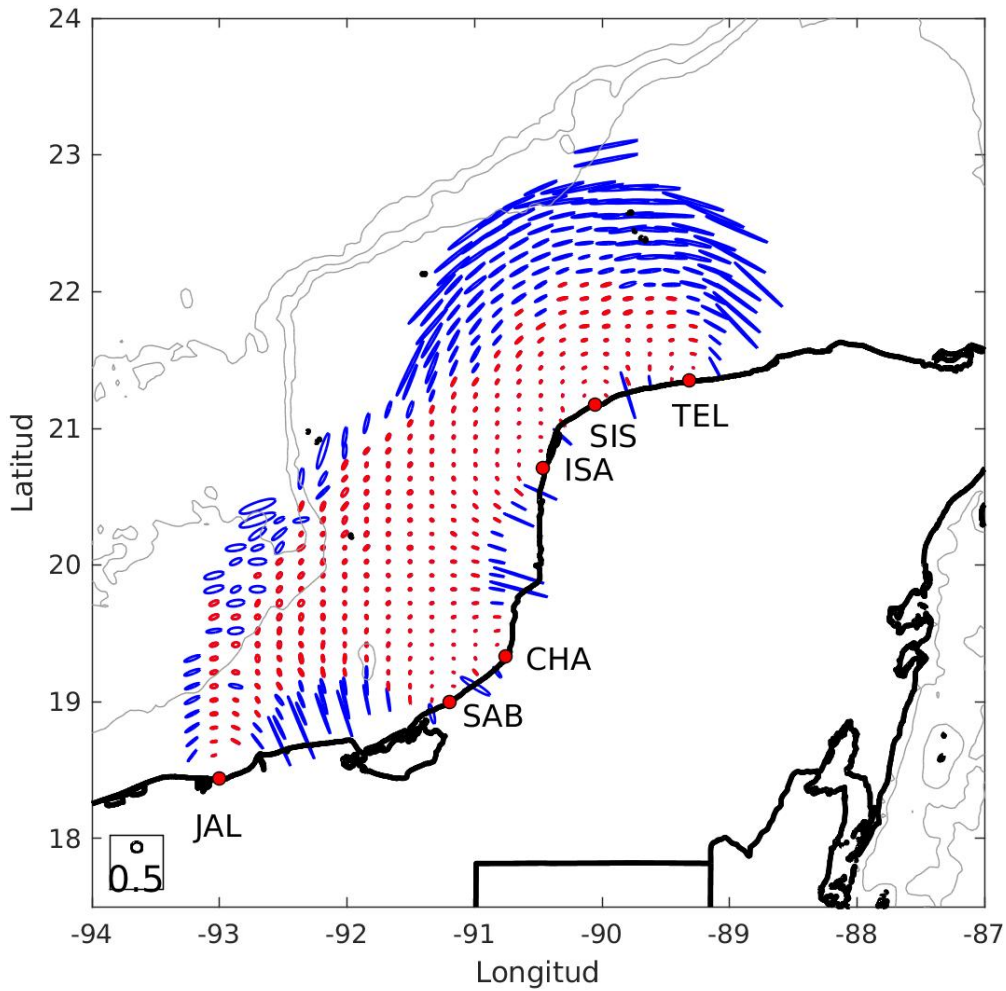


Figura 4. Malla de GDOP estimada para las 6 estaciones de radar, asumiendo una cobertura constante de 180 km. Las elipses azules representan un error por geometría, ya que tienen una relación $>$ al 0.5 entre el semi eje mayor y el semi eje menor, se puede apreciar que estas se elongan hacia el eje que no pueden resolver. Las elipses rojas tienen una relación $<$ al 0.5 entre el semi eje mayor y el semi eje menor, lo que indica que sus componentes son casi ortogonales, por lo que son regiones donde es viable resolver las corrientes totales a partir de las corrientes radiales medidas por los HFR. Los puntos rojos en la costa indican la ubicación de los seis radares, Telchac (TEL), Sisal (SIS), Isla Arena (ISA), Champotón (CHA), Sabancuy (SAB) y Jalapita (JAL).

2.2. Productos adicionales

2.2.1. Altimetría satelital (SSH)

Para estudiar los patrones de circulación geostrófica en la superficie, se utilizaron promedios diarios de altura del nivel de mar obtenida de un reanálisis de productos de altimetría satelital. Del dato de altura de nivel de mar es posible derivar las velocidades geostróficas a partir de:

$$u_g = -\frac{g}{f} \frac{d\eta}{dy} \quad (2.1a)$$

$$v_g = \frac{g}{f} \frac{d\eta}{dx} \quad (2.1b)$$

donde: u_g y v_g son las velocidades longitudinales y latitudinales; g es el valor de la gravedad (-9.8 m s⁻¹); f es el parámetro de Coriolis, y $d\eta$ representa los cambios de η en x y en y .

Los datos utilizados fueron generados por el Servicio de Monitoreo del Medio Marino Copernicus (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) del año 2019, del cual se obtendrá un campo de η , y velocidad geostrófica (u y v), sobre una malla cartesiana con resolución espacio-temporal de ~10 km (1/12°) horizontales y un día, respectivamente.

2.2.2. Temperatura superficial del mar (SST)

Para estudiar la variación espacio-temporal de la temperatura de la superficie del mar (SST, por sus siglas en inglés), se utilizará el Sistema Operativo SST y Análisis de Hielo Marino (OSTIA), descrito en Donlon et al. (2012). OSTIA utiliza una combinación de datos satelitales (ENVISAT-AATSR Advance Along Track Scanning Radiometer) y datos *in-situ* medidos con boyas de deriva, para realizar un análisis basado en interpolación óptima a múltiples escalas diseñada para aplicaciones en predicción numérica del clima y sistemas de pronóstico oceánico. El sistema OSTIA filtra todos los datos con variabilidades menores a un día y produce una estimación

diaria de SST global a una resolución de $1/20^\circ$ (~ 6 km), y precisión de $\sim 0.5^\circ$ C (Donlon et al., 2012).

OSTIA se encuentra disponible a través del Servicio de Monitoreo del Medio Marino Copernicus (Copernicus Marine Environment Monitoring Service). Con este producto se construyó una base de datos del año 2019, que permitió observar los cambios en los campos de temperatura superficial, y a su vez con las corrientes geostróficas.

2.2.3. Modelo HYCOM

El modelo HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) es un modelo de circulación oceánica que combina tres tipos de coordenadas verticales (z , σ e isopicana). Este enfoque de coordenadas verticales generalizadas es dinámico en el espacio y tiempo a través de la ecuación de continuidad de capas, que permite una transición dinámica entre los tipos de coordenadas, es decir, permite el estudio con mayor detalle de las zonas de estratificadas y de mezcla en ecosistemas marinos en aguas profundas y en las regiones costeras. El modelo del Golfo de México utilizado es el HYCOM + NCODA Gulf of Mexico $1/25^\circ$ Analysis (GOMu0.04/expt_90.1m000) y tiene una resolución ecuatorial de $1/25^\circ$ y una resolución latitudinal de $1/25^\circ \cos(\text{lat})$ o ~ 3.5 km para cada variable en latitudes medias. La versión de HYCOM utilizada es la 2.2.99G-i, y el experimento incluye el forzamiento de la marea (HYCOM, 2022).

El sistema utiliza el sistema NCODA (Navy Coupled Ocean Data Assimilation) para la asimilación de datos. NCODA usa el modelo de predicción como primera conjetura y asimila las observaciones disponibles del altímetro satelital (obtenido a través del Naval Oceanographic Office (NAVOCEANO) Altimeter Data Fusion Center) y la temperatura superficial *in-situ*, así como la disponibilidad de los perfiles verticales de temperatura y salinidad de batitermógrafos (XBT's), flotadores Argo y boyas ancladas. Las variables que brinda HYCOM son: altura superficial del mar (SSH), temperatura superficial del mar (SST), salinidad, y las componentes de velocidad U y V (HYCOM, 2022).

2.2.4. Mapas de viento

Para la variabilidad espacial y temporal de viento en la región de estudio, se utilizaron los datos de viento del año 2019, obtenidos de ERA5. Los datos incluyen información del campo de viento superficial (10 m sobre la superficie del mar), en una malla (u y v) con una resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, con datos cada hora durante los experimentos y su uso permitirá estimar las intensidades del viento.

Con base en la información satelital descrita, se estudió la variabilidad oceánica en la plataforma continental de Campeche-Yucatán, se utilizaron los campos de viento, y las corrientes geostróficas, para estudiar y describir la variabilidad de las corrientes superficiales presentes en la región, y posteriormente se correlacionó la dinámica descrita, con los datos de HFR.

2.3. Datos *in-situ*

2.3.1. Derivadores superficiales

Los DORIS (Derivadores Oceánicos Remotos *in situ*) son sondas oceanográficas Lagrangeanas diseñadas y fabricadas en los laboratorios del Observatorio Oceanográfico Regional Costero (OORCo) del Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California. DORIS ha sido documentado y utilizado en otros estudios como por ejemplo Gómez-Roa et al. 2020 y González, 2017. El instrumento realiza mediciones autónomas y las transmite en tiempo real, cuentan con un GPS de alta precisión tipo WAAS (Wide Area Augmentation System) con un error de $\pm 1-3$ m, un panel solar que brinda autonomía de varios meses, un papalote sub-superficial que funciona como draga de arrastre a un metro de profundidad y un microcontrolador con capacidad de obtener, procesar y enviar en tiempo real variables como la temperatura y posición geográfica, entre otras.

Su diseño es compacto, ligero y económico, por lo que son de fácil liberación y se pueden considerar desechables. La **Figura 5a** muestra el esquema de DORIS, el cual incluye una draga

sub-superficial para garantizar la deriva por acción directa de las corrientes y minimizar al máximo la acción directa del viento sobre el elemento de flotación. La **Figura 5b** muestra una DORIS en el agua inmediatamente después de ser liberada y su draga subsuperficial.

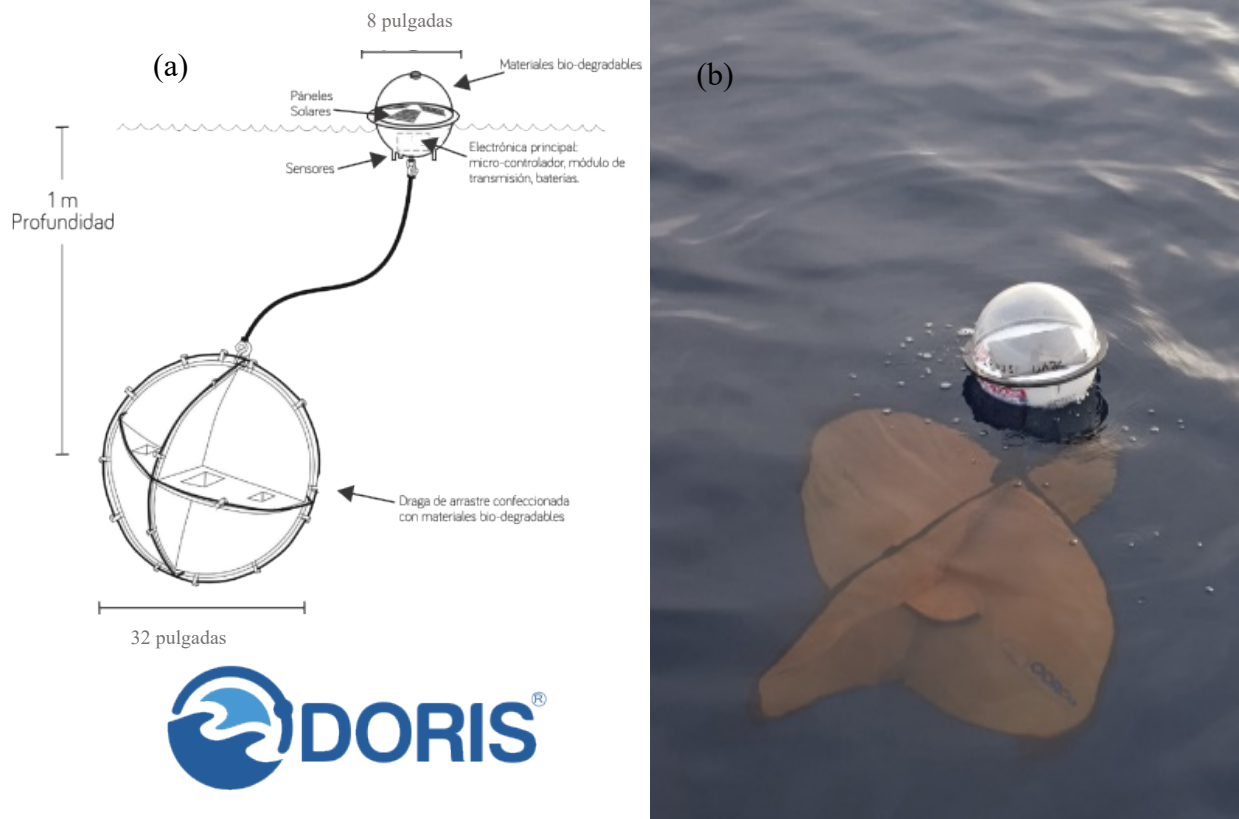


Figura 5.- a) Esquema de los derivadores oceánicos DORIS. b) Esfera de flotación de DORIS con su panel solar interior y draga subsuperficial ubicada a 1 m de profundidad.

El procesamiento de los datos para los derivadores consistió en eliminar datos registrados a bordo de la embarcación, datos en tierra, así como las posiciones erróneas por mal geoposicionamiento. Los datos de posición fueron obtenidos con un GPS tipo WAAS de alta precisión (1-3 m), con una tasa de muestreo de aproximadamente cada hora, los cuales fueron almacenados como longitud y latitud. Para cada boya, se calcula la distancia desplazada entre cada

posición, y se utilizó el esquema de diferencias centradas (Poulain et al., 2009) para calcular las componentes de velocidad (u , v), donde:

$$u = \frac{dx}{dt} \quad v = \frac{dy}{dt}$$

dx = La diferencia en metros de las longitudes del punto anterior y el posterior.

dy = La diferencia en metros de las latitudes entre el punto anterior y posterior.

dt = Intervalo de una hora, en segundos.

Con los componentes de velocidad (u , v) se calculó la magnitud de la misma como:

$$|V| = \sqrt{u^2 + v^2}$$

Los datos de temperatura medidos por el DORIS a 20 cm de profundidad, fueron en intervalos de aproximadamente cada hora y obtenidos con un sensor de temperatura modelo 18b20 genérico, con resolución de 12 bits (0.06° C).

2.3.2. Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)

Los Acoustic Doppler Current Profiler (ADCPs) utilizados fueron anclados a diferentes profundidades, y con diferentes tasas de muestreo (**Tabla 2**). En Campeche se utilizaron ADCPs de la marca Nortek, modelo AWAC (Acoustic Wave and Current Profiler) de 1 MHz, anclados a diferentes profundidades, y midieron bins a partir de 1.4 m sobre el fondo, este modelo tiene un tamaño de celda variable de 0.25 – 4.0 m, con un rango de velocidad $\pm 10 \text{ m s}^{-1}$ horizontal, \pm a través del beam, con una precisión de $\pm 1\%$ del valor medido $\pm 0.5 \text{ cm s}^{-1}$, el modelo AWAC usado es la herramienta óptima para mediciones de oleaje y corrientes someras como en la zona de estudio. El ADCP frente a Sisal fue marca Teledyne Marine, modelo Sentinel V ADCP –RD

Instruments- de 1 MHz, anclado a una profundidad de 11 m, y tiene una precisión de velocidad de $\pm 0.3 \text{ cm s}^{-1}$, con un rango de velocidad $\pm 5 \text{ m s}^{-1}$ a $\pm 20 \text{ m s}^{-1}$.

Tabla 2. Ubicación, tiempos de muestreo y profundidad para los sitios de ADCPs.

	Lerma	Champotón	Chenkan	Sisal
Posición	19.973° N, 90.87473 ° W	19.48385° N, 90.9767° W	19.3043° N, 91.11565° W	21.27529° N, 90.05178° W
Tasa de muestreo	Datos cada hora	Datos cada hora	Datos cada 20 minutos	Datos cada hora
Muestreo	12-Mar-2019 al 23-Mar-2019	01-Dic-2017 al 31-Dic-2017	15-Ene-2019 al 31-Ene-2019	01-Ene-2019 al 28-Feb-2019
Profundidad del anclaje	10.6 m	11.6 m	14.5 m	11 m
Profundidad de la medición más superficial	2.6 m	2.6 m	4.6 m	1.4 m
Precisión de la velocidad	0.5 cm/s	0.5 cm/s	0.5 cm/s	0.5 cm/s

Capítulo 3. Resultados

3.1. Validaciones

Se realizaron validaciones de los datos obtenidos por los Radares de Alta Frecuencia (HFR), mediante una comparación de datos Lagrangianos obtenidos por un Derivador DORIS en la región frente a Tamaulipas-Veracruz, durante el mes de agosto de 2019, y de cuatro ADCPs que obtuvieron datos Eulerianos de corrientes en las regiones de Lerma, Champotón, Chenkan y Sisal durante los periodos indicados en la **Tabla 2**.

Algunos de los datos de validación utilizados (*e.g.* Doris), no necesariamente coinciden en tiempo y espacio, con los datos de este estudio (PCCY, año 2019), sin embargo, fueron utilizados como datos de “oportunidad” ya que, al día de hoy, son los únicos disponibles para diagnosticar el desempeño de la red de radares del Golfo de México (ver **Anexo 1**).

Además, debido a que la plataforma costera de Campeche-Yucatán es somera, y con el fin de visualizar los cambios batimétricos de la región, se muestra la batimetría de 0 a 500 m de profundidad (ver **Anexo 2**).

3.1.1. ADCPs vs HFR

Para analizar y comparar los datos de los ADCPs vs los HFR, se realizaron promedios cada 3 horas a ambas fuentes de datos, además se les aplicó un filtro para eliminar las frecuencias diurnas (como las mareas y efecto de las brisas) con la finalidad de reducir la variabilidad diurna en los datos.

La **Figura 6** muestra la ubicación de los anclajes de ADCP frente a Lerma, Champotón y Chenkan representados con asteriscos de color magenta, azul y rojo respectivamente, así como una línea gruesa del mismo color en el origen del anclaje que muestra el vector promedio y su respectiva elipse de variabilidad para el periodo de muestreo (01-dic-2017 al 01-jun-2019). Sobrepuesto, se encuentra el promedio de los mapas de corrientes (campo vectorial color negro) obtenidos por los radares HF de Campeche, a forma de cortesía se indica la elipse de variabilidad y vector promedio

(línea negra gruesa) de la celda HFR más cercana a la posición de cada uno de los anclajes de ADCP. Así mismo la línea verde punteada representa la isobata de los 20 m de profundidad.

De manera general, las bases de datos son similares, la variabilidad y vector promedio tienen buen acuerdo, para las corrientes superficiales medidas con los radares HF en las costas de Campeche durante el periodo de muestreo, la dirección dominante fue hacia el suroeste, con velocidades mínimas de ~ 0.05 hasta máximos de ~ 0.25 m s^{-1} , la dirección y magnitud mostrada por los radares HF es consistente con lo mencionado en Kurczyn et al. (2021), donde reporta que las velocidades registradas frente a Lerma, Champotón y Chenkan oscilan entre ~ 0.07 y ~ 0.18 m s^{-1} , con direcciones preferentes hacia el sur y con mínimas inversiones durante el año.

Un aspecto a resaltar es sobre el vector promedio de Lerma, ya que pareciera no tener un vector bien definido, sin embargo, el valor del vector es mínimo, lo que nos indica que la dirección de las corrientes es variable, sin una dominancia marcada como en los datos de Chenkan, así mismo, la excentricidad de la elipse se orienta de forma perpendicular a la costa, lo que sugiere que las corrientes en particular de Lerma, no tienen un flujo permanente hacia el suroeste.

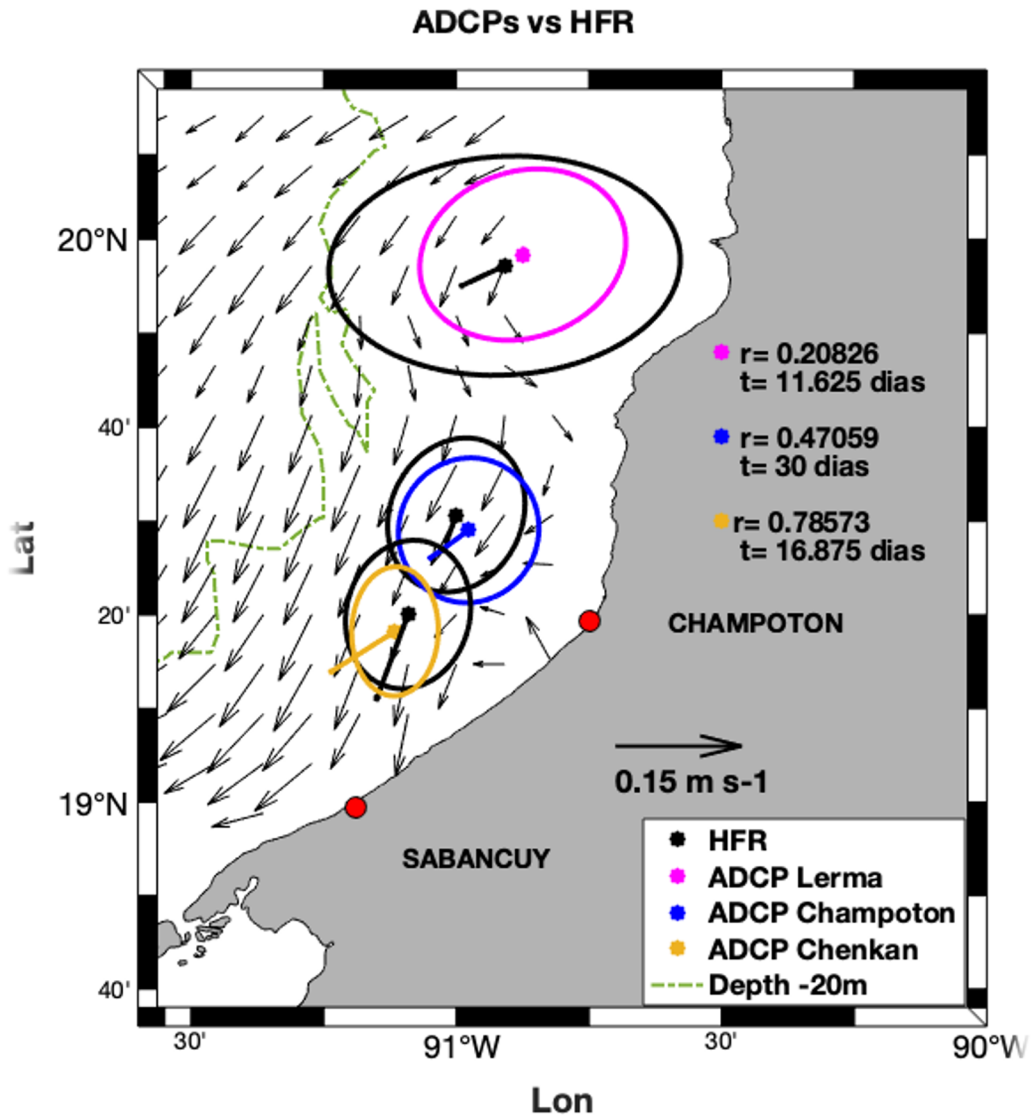


Figura 6. Mapa sinóptico de la dirección e intensidad de las corrientes superficiales medidas con los HFR, y las elipses de variabilidad con vectores de magnitud promedio de los HFR (color negro), y de los ADCPs de Lerma (color magenta), Champotón (color azul), y Chenkan (color amarillo), y la isobata de los 20 m de profundidad (línea punteada color verde).

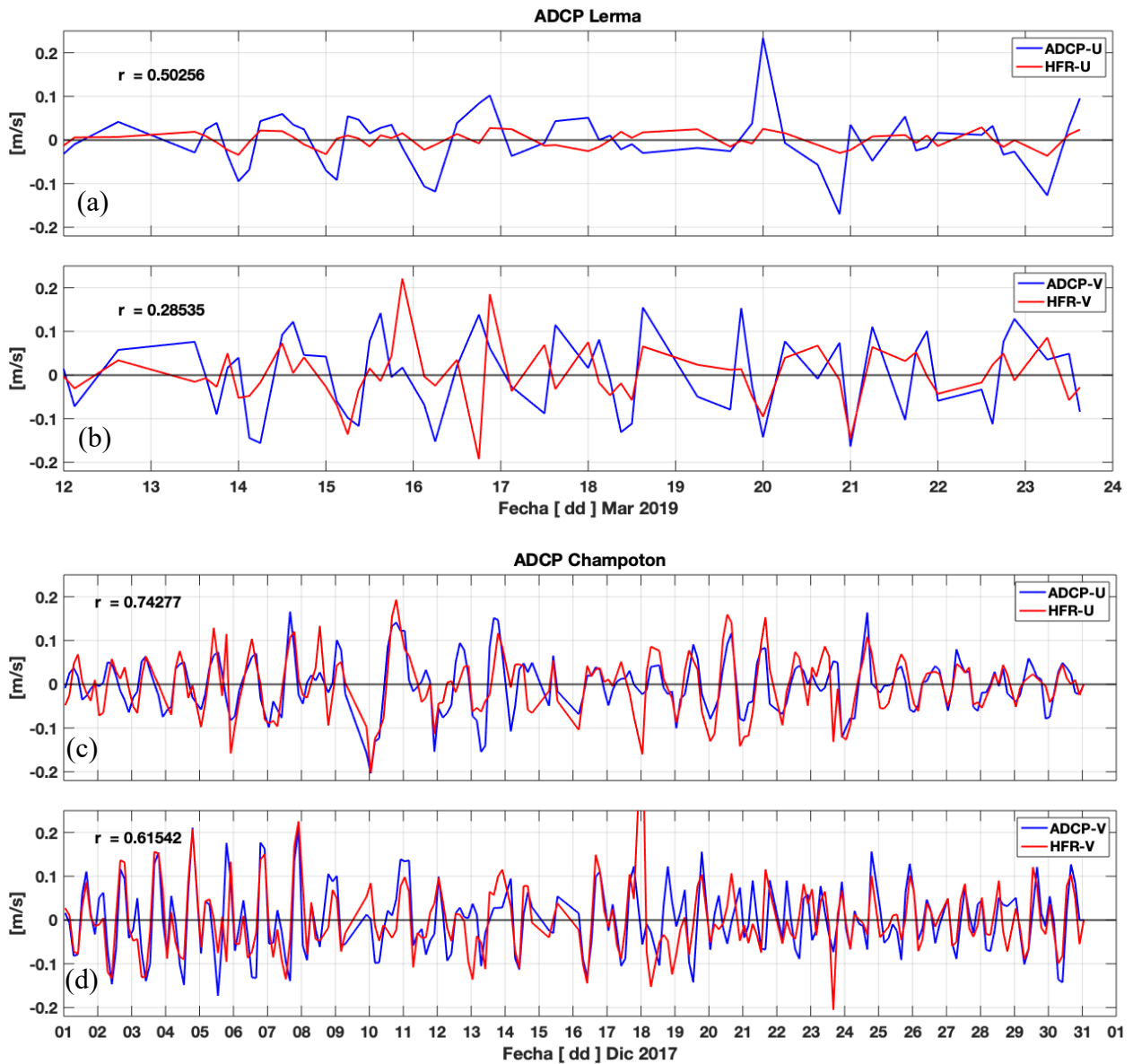
Para analizar más a detalle la similitud entre ambas fuentes de información (ADCP y HFR), la **Figura 7** muestra una descomposición vectorial (zonal y meridional) de las series de tiempo de corrientes superficiales medidas de forma simultánea con ambos instrumentos. En la **Figura 7**, las

series de tiempo de Lerma medidas por los HFR (línea roja) se puede apreciar que la variabilidad de componente zonal (a) fue menor en comparación con la componente meridional (b), esto pudiera explicarse por la orientación de la línea de costa (ver **Fig. 6**), que mostró una influencia sobre las corrientes, de forma que, su eje de máxima varianza es perpendicular a la costa. En el caso de Champotón, las series de tiempo de la componente zonal (c) y meridional (d) mostraron corrientes que oscilan con frecuencia diurna, con magnitudes muy similares con una ligera tendencia hacia el suroeste (**Fig. 6**).

En cuanto al análisis de las series de tiempo de Chenkan, se notó que en la componente zonal (e) la variabilidad y el coeficiente de correlación fue menor en comparación a la componente meridional (f). La dinámica inferida por los datos de radar HF y el ADCP en Chenkan, sugiere corrientes hacia el sur-oeste, con un vector promedio resultante hacia el suroeste mayor que la elipse de variabilidad en ambas fuentes de información ADCP y HFR (a diferencia de Lerma y Champotón), como se muestra en la **Figura 6**.

Del análisis anterior se puede deducir que la dinámica de la región costera de Campeche pudiera complementarse de forma significativa con los datos de los HFR, en el sentido de que, para estas regiones discretas los ADCPs presentaron de forma independiente ciertas diferencias entre ellos. En particular el ADCP de Lerma presentó una elipse con el eje mayor orientado de forma perpendicular a la costa y un vector promedio menor que la elipse, lo que indica una dirección variable sin que sea un flujo necesariamente hacia el sur sur-oeste. El caso de Champotón es similar, pero sin que la elipse nos de información sobre la dirección del flujo preferencial. Por el contrario, el ADCP de Chenkan si mostró un vector promedio mayor que la elipse de variabilidad, lo que nos indica que en esa región sí hay un flujo preferente hacia el sur-oeste, la elipse es ligeramente más excéntrica y se orienta hacia el sur. De forma aislada, estos resultados pudieran parecer sin mucho sentido, sobre todo el ADCP de Lerma que es muy diferente a los otros dos. Sin embargo, cuando observamos el mapa sinóptico de los HFR, todo cobra mucho sentido, ya que se puede apreciar como la corriente costera en realidad es un sistema que “serpentea” siguiendo la forma de la línea de costa. Mientras que al norte del estado de Campeche las corrientes van hacia el sur-oeste, por lo que pudiera ser la influencia de las corrientes de las costas de Yucatán, en la región central de Campeche (Lerma-Champotón) las corrientes viran hacia el sur e inclusive sur-

este por posible influencia de la costa. En contraste, al sur de las costas de Campeche (Sabancuy – Ciudad del Carmen) las corrientes son hacia el oeste siguiendo la forma de la línea de costa.



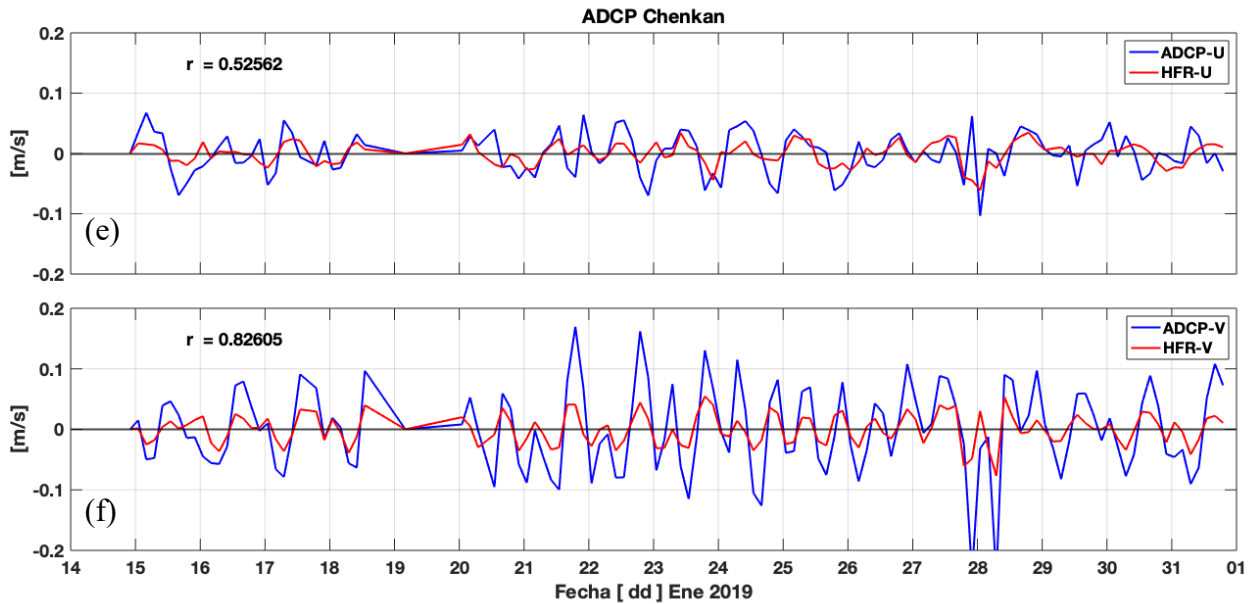


Figura 7. Series de tiempo para los datos de HFR (color rojo), y de los ADCPs (color azul). a) Datos de la componente zonal y b) meridional de Campeche. c) Datos de la componente zonal y d) meridional de Champotón. e) Datos de la componente zonal y f) meridional de Chenkan.

Es interesante observar, de que a pesar de que las corrientes de ambas fuentes son similares en patrones, flujos, direcciones e intensidades, las correlaciones no son tan altas como uno esperaría. Esto pudiera deberse a las diferencias físicas de los muestreos, mientras que los ADCPs muestrean una parcela de agua de algunos metros cuadrados y a profundidades típicas de entre 3 y 5 m, los HFR muestrean parcelas de agua de cientos de metros cuadrados a profundidades de menos de 1.5 m de agua. De la **Tabla 3** podemos observar que los valores más altos de correlación están asociados a profundidades similares, caso de Champotón vs HFR, y valores de GDOP más bajos (buena ortogonalidad para las estaciones de HFR). También podemos apreciar que, dependiendo de la región, como es el caso de la componente meridional de Chenkan, la correlación pudiera ser buena, básicamente porque en esa región pareciera existir un flujo preferencial hacia el oeste muy persistente.

La **Tabla 3**, muestra los valores de correlación entre los HFR y los distintos anclajes de las costas Campechanas.

Tabla 3. Coeficientes de correlación, valor P y diferencias de medición entre los ADCPs y HFR.

	Lerma	Champton	Chenkan
Coeficiente de correlación y valor P Comp. zonal	r =0.50256 P =7.91x10 ⁻⁰⁵	r =0.74277 P=1.69x10 ⁻³⁹	r =0.52562 P=3.651x10 ⁻¹⁰
Coeficiente de correlación y valor P Com. meridional	r =0.28535 P=0.033	r =0.61542 P=4.12x10 ⁻²⁴	r =0.82605 P=3.61x10 ⁻³²
Profundidad de la medición de los ADCPs	2.6 m	2.6 m	4.6 m
Profundidad de la medición de los HFR	1.48 m	1.48 m	1.48 m
GDOP de los HFR	~0.45	~0.2	~0.3
Precisión de los HFR	~ 3 cm s ⁻¹	~ 3 cm s ⁻¹	~ 3 cm s ⁻¹
Precisión de los ADCP	±0.5 cm s ⁻¹	±0.5 cm s ⁻¹	±0.5 cm s ⁻¹

Por último, cabe mencionar que los patrones y magnitudes de las corrientes obtenidas por los ADCPs y los radares HF son comparables con trabajos previos en la región como Martínez-López y Parés-Sierra (1998) donde sus resultados indican velocidades de entre 0.05-0.17 m s⁻¹ hacia el sur-oeste para Campeche y velocidades de 0.07 m s⁻¹ hacia el oeste para Chenkan. Así como con autores como Kurczyn et al. (2021) donde mencionan que en julio del 2018 el promedio de velocidades frente a Champotón y Chenkan osciló entre 0.07 y 0.18 m s⁻¹ con dirección sur-oeste.

Por otro lado, la **Figura 8** muestra la ubicación de un anclaje de ADCP frente a Sisal (en la península de Yucatán). El anclaje se encontraba a ~ 15 km de la costa y es representado con un asterisco de color magenta en la figura, con su respectivo vector promedio y elipses de variabilidad. Se presentan también los datos producidos por los radares HF (vectores y elipse negra) para el mismo periodo (1 de enero al 28 de febrero de 2019).

Al igual que el caso de Campeche, en esta región, la información discreta proporcionada por el ADCP complementa de muy buena forma los radares HFR, mientras que el ADCP “ve” una elipse elongada que forma un ángulo de aproximadamente 45 grados con la línea de costa y un vector promedio en la misma dirección ligeramente mayor que la variabilidad, el campo sinóptico de los HFR muestra la presencia de un probable giro anticiclónico que explica la orientación y variabilidad del flujo observado por el ADCP anclado frente a Sisal. Además, la dinámica de las costas de Yucatán presenta una bifurcación de corrientes en su límite occidental, con dirección hacia el noroeste frente a Celestún y la otra en dirección hacia el suroeste en las costas de Campeche.

Para revisar a fondo la comparación entre ambas fuentes de información, se presenta la **Figura 9**, donde se puede apreciar el coeficiente de correlación con valor de 0.8 para la componente zonal y con un valor P de 2.23×10^{-06} , y de 0.22 para la componente meridional con valor P de 1.023×10^{-103} . Se observó también que las corrientes de los HFR fueron de manera general más fuertes que las capturadas por el ADCP (en particular en la componente zonal), lo cual podría ser explicado por la profundidad de medición del ADCP y el GDOP de los radares (ver **Tabla 3**).

De forma general, esta comparativa nos permite confiar en los datos de radar que serán analizados en las siguientes secciones.

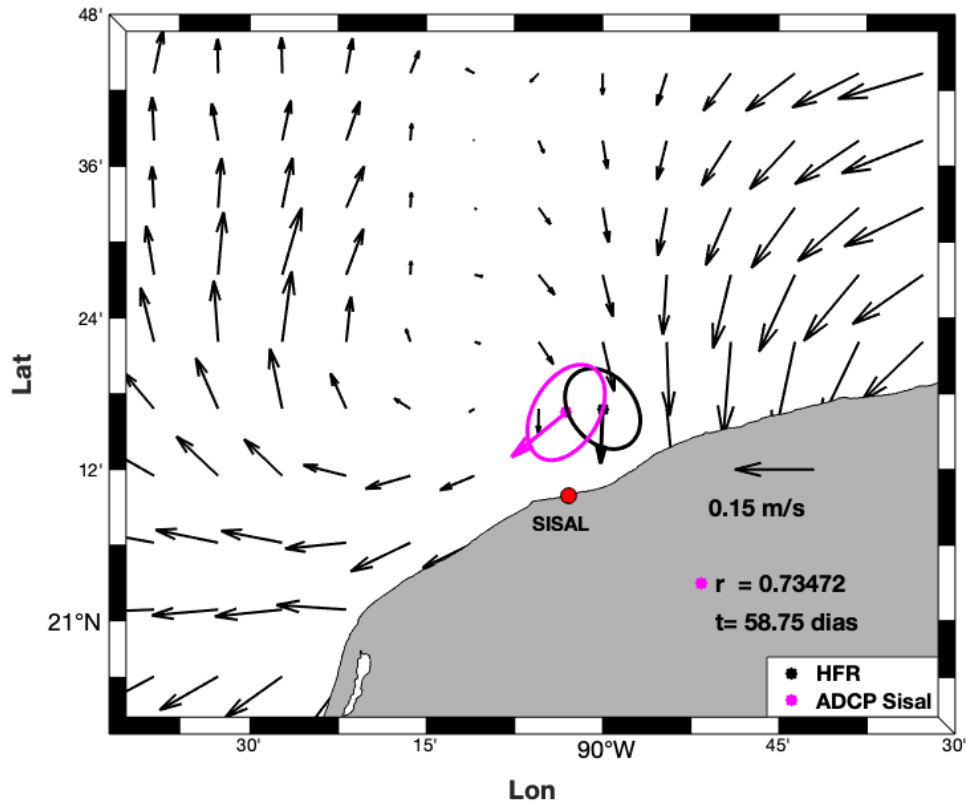


Figura 8. Mapa sinóptico frente a Sisal de la dirección e intensidad de las corrientes superficiales medidas con los HFR, y las elipses de variabilidad con vectores de magnitud promedio de los radares HF (color negro), y del ADCPs de Sisal (color magenta).

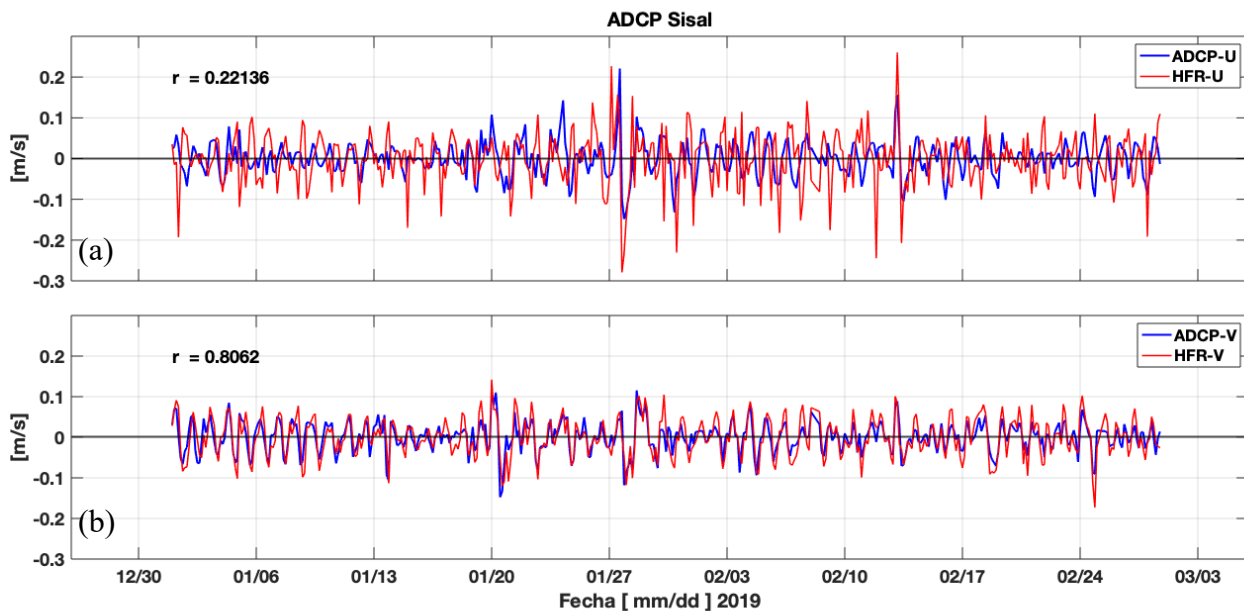


Figura 9. Series de tiempo para los datos de HFR (color rojo), y del ADCP de Sisal (color azul). a) Datos de la componente zonal y b) meridional.

3.1.2. SSH vs HFR

La **Figura 10** muestra un promedio anual de datos sinópticos de SSH (Sea Surface Height, por sus siglas en inglés) en vectores azules, sobrepuesto con el promedio anual de los datos de HFR (en vectores color negro), se resalta el área de cobertura promedio de los HFR (área sin sombrear), así como las ubicaciones de los seis sitios de radar (círculos rojos en la costa) que se utilizaron en este trabajo.

La circulación obtenida muestra un sistema de corrientes en buen acuerdo entre ambas bases de datos. Se observa un flujo hacia el oeste frente a Yucatán que tiende a seguir la línea de costa y vira hacia el sur-oeste en Campeche para finalmente dirigirse hacia el oeste frente al límite occidental de Campeche (Tabasco). Algunas pequeñas diferencias pueden ser observadas en la región de transición entre Campeche y Tabasco, así como en la zona frente a Sisal donde las corrientes geostroficas determinadas de SSH no presentan el remolino anticiclónico detectado por los HFR. Estas diferencias pudieran resultar del hecho de que las estimaciones geostroficas no

tienen por qué coincidir con procesos ageostróficos (e.g. influencia del viento), por lo que serán discutidas más adelante.

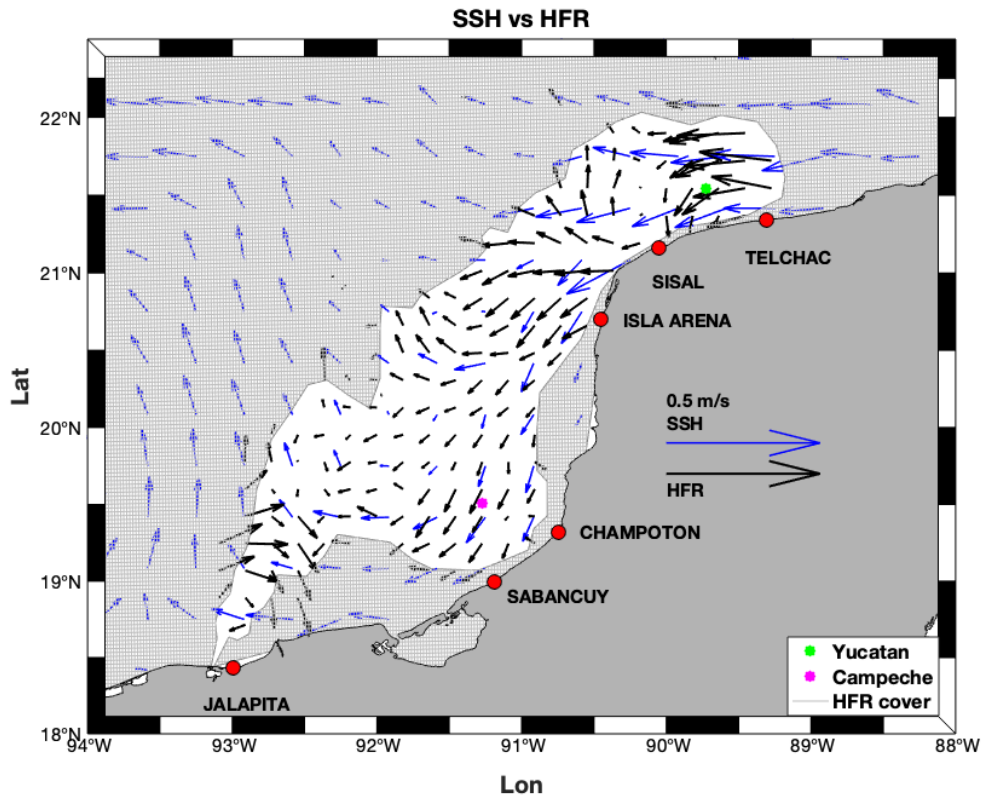


Figura 10. Corrientes superficiales promedio obtenidas de SSH (color azul) y HFR (color negro) en el año 2019, las zonas de interés para Yucatán (punto verde) y Campeche (punto magenta). Se resalta la cobertura promedio de los HFR y la ubicación de los seis sitios de radar.

Se muestran también dos sitios de los cuales se extrajeron series de tiempo, uno frente Yucatán (punto verde) y otro frente a Champotón (punto magenta). Los coeficientes de correlación fueron de 0.7946 para Yucatán y de 0.2723 para Campeche.

Los paneles de la **Figura 11**, muestran las componentes zonal y meridional frente a Yucatán y Campeche extraídas de SSH (color azul) y de los radares HF (color rojo) en dos sitios representativos, uno frente Yucatán (punto verde en **Figura 10**) y otro frente a Champotón (punto magenta en **Figura 10**). La dinámica en Yucatán en la componente zonal (a) mostró una dirección típica hacia el oeste durante todo el año, pero con dos estaciones marcadas, una durante primavera-verano donde la dirección es constante hacia el oeste, y otra durante el otoño-invierno donde las variaciones en intensidad y dirección se pueden asociar a los eventos nortes. En la componente meridional (b) el comportamiento es similar, durante primavera-otoño no hay una dirección dominante, y durante el otoño-invierno las variaciones en intensidad y dirección están asociadas a los vientos nortes.

En las series de tiempo de Campeche, durante los meses de junio hasta octubre, la ausencia de datos de radar impidió analizar completamente las series de tiempo, sin embargo, con los datos existentes se observó que en la componente zonal (c) la dirección fue hacia el oeste durante casi todo el año, con algunas inversiones durante el otoño-invierno, ocasionadas por los nortes. En la componente meridional (d) durante primavera-verano hay menor variación debida a los vientos alisios constantes, en comparación a los eventos nortes durante el otoño-invierno.

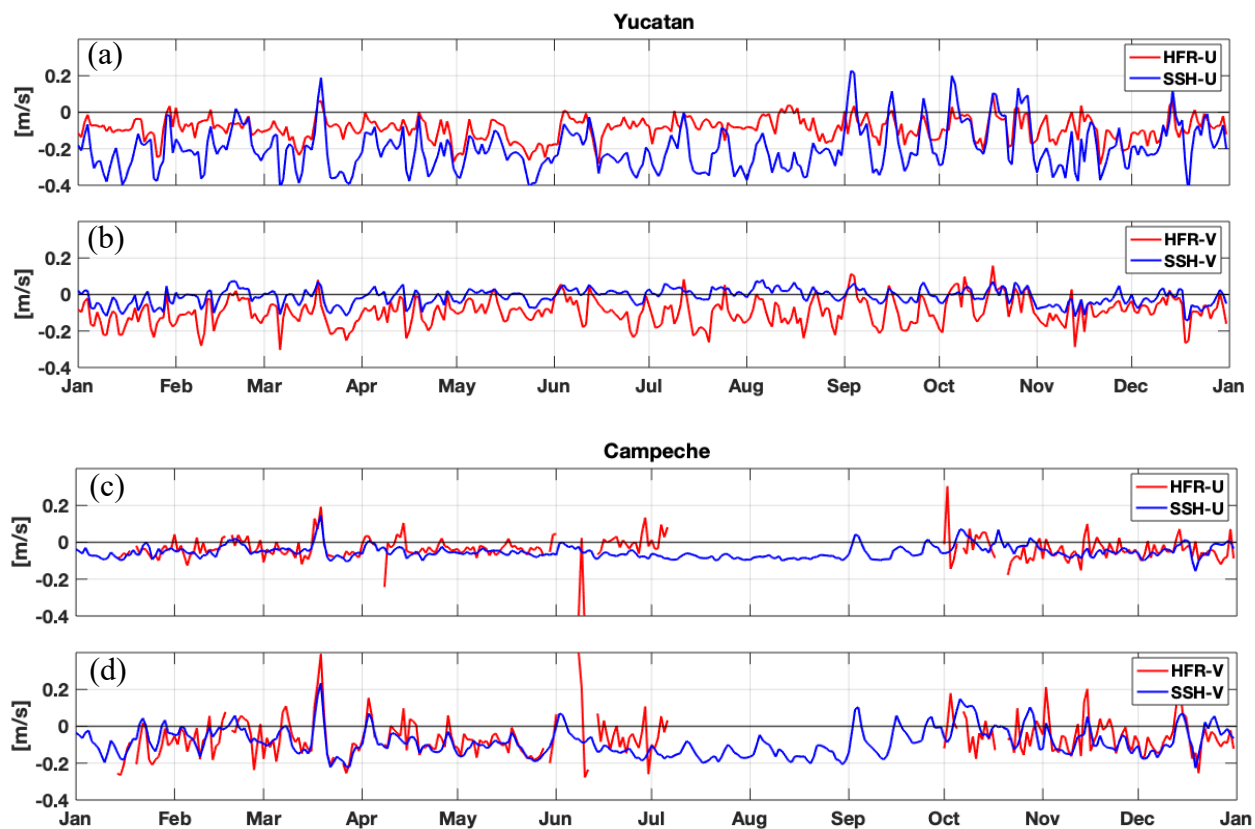


Figura 11. Series de tiempo para los datos de SSH (color azul), y de los HFR (color rojo). a) Datos de la componente zonal y b) meridional de Yucatán, c) Datos de la componente zonal y d) meridional de Campeche.

3.1.3. HYCOM vs HFR

La **Figura 12** muestra el promedio anual (a partir de salidas horarias del modelo) de corrientes superficiales (datos de la capa más superficial, 0 m de profundidad) del 2019 obtenidas del modelo HYCOM (vectores azules) sobre puestas al promedio anual de datos obtenidos con los HFR (vectores negros). La figura está estructurada de la misma forma que la **Figura 10**. La circulación obtenida del modelo HYCOM muestra una dirección comparable con las bases de datos de HFR y de SSH, con básicamente las mismas regiones, i.e. frente a Sisal y en el límite entre

Campeche y Tabasco, donde las fuentes de información parecen discrepar. Sin embargo, el resto de la región parece estar en buen acuerdo.

Frente a Yucatán la dirección dominante fue hacia el oeste con velocidades de $\sim 0.25 \text{ m s}^{-1}$, frente a Sisal, y al igual que en los datos de SSH, no aparece el remolino anticiclónico y no se observó la bifurcación en límite occidental de Yucatán (LOY) entre Sisal e Isla Arena que se muestra en los radares HF, lo cual significa que, a pesar de que el modelo HYCOM es un modelo numérico de última generación, hay que recordar que asimila datos de altimetría para su análisis operativo, eso explicaría por qué tampoco se pueden observar los remolinos anticiclónicos en este modelo oceánico.

Frente a las costas de Campeche, la circulación fue similar entre las salidas de HYCOM y los HFR, con velocidades de $\sim 0.10 \text{ m s}^{-1}$, y con una dirección hacia el sur-suroeste orientada a la línea de costa. Los resultados entonces sugieren que las corrientes en Campeche son de menor intensidad en comparación con Yucatán, lo que se podría explicar como una zona de calma o de transición, talvez influenciada por la batimetría y la orografía, precisamente entre Yucatán y Tabasco.

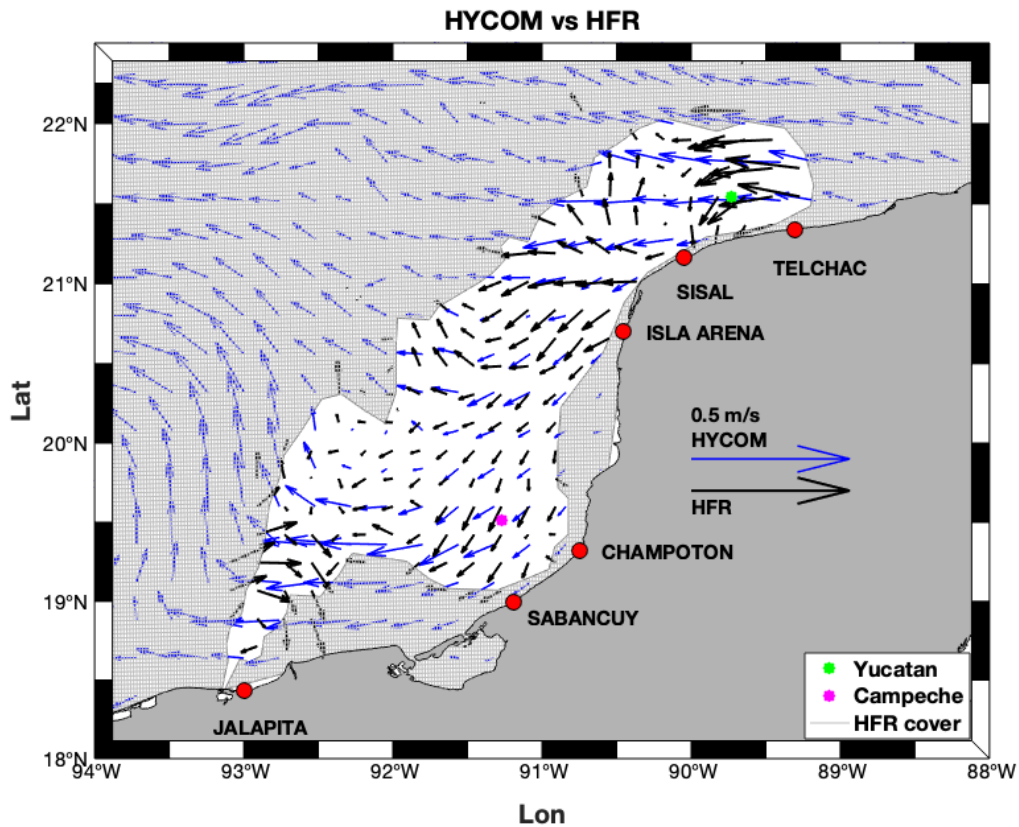


Figura 12. Corrientes superficiales promedio obtenidas del modelo HYCOM (color azul) y HFR (color negro) en el año 2019, las zonas de interés para Yucatán (punto verde) y Campeche (punto magenta). Se resalta la cobertura promedio de los HFR y la ubicación de los seis sitios de radar.

Los paneles de la **Figura 13**, muestran las componentes zonal y meridional frente a Yucatán y Campeche medidas con HYCOM, en las que es de notar, la dinámica es muy similar a las obtenidas por SSH, en Yucatán en la componente zonal (a) la dirección típica es hacia el oeste durante todo el año, sin embargo, hay dos estaciones marcadas, una durante la primavera-verano con dirección hacia el oeste, y otra durante el otoño-invierno en la que hay variaciones en intensidad y cambios de dirección ocasionados por los eventos nortes. En la componente meridional (b) se observa un comportamiento estacional también, durante primavera-verano no hay una dirección marcada norte-sur, mientras que en otoño-invierno los vientos nortes generan cambios en dirección e intensidad hacia el sur en ambas fuentes de datos.

En las series de tiempo de Campeche, durante los meses de junio hasta octubre hubo una ausencia de datos que impidió analizar completamente la serie de tiempo, sin embargo, para la componente zonal (c) la dirección es hacia el oeste durante todo el año, con ligeras variaciones durante el otoño-invierno ocasionadas por los eventos nortes, así mismo, en la componente meridional (d) durante la misma temporada, la presencia de los vientos nortes intensos se hicieron notar sobre las corrientes superficiales, por ejemplo, en el evento norte durante los días 18-20 de diciembre que se observa en las series de tiempo de ambos sitios.

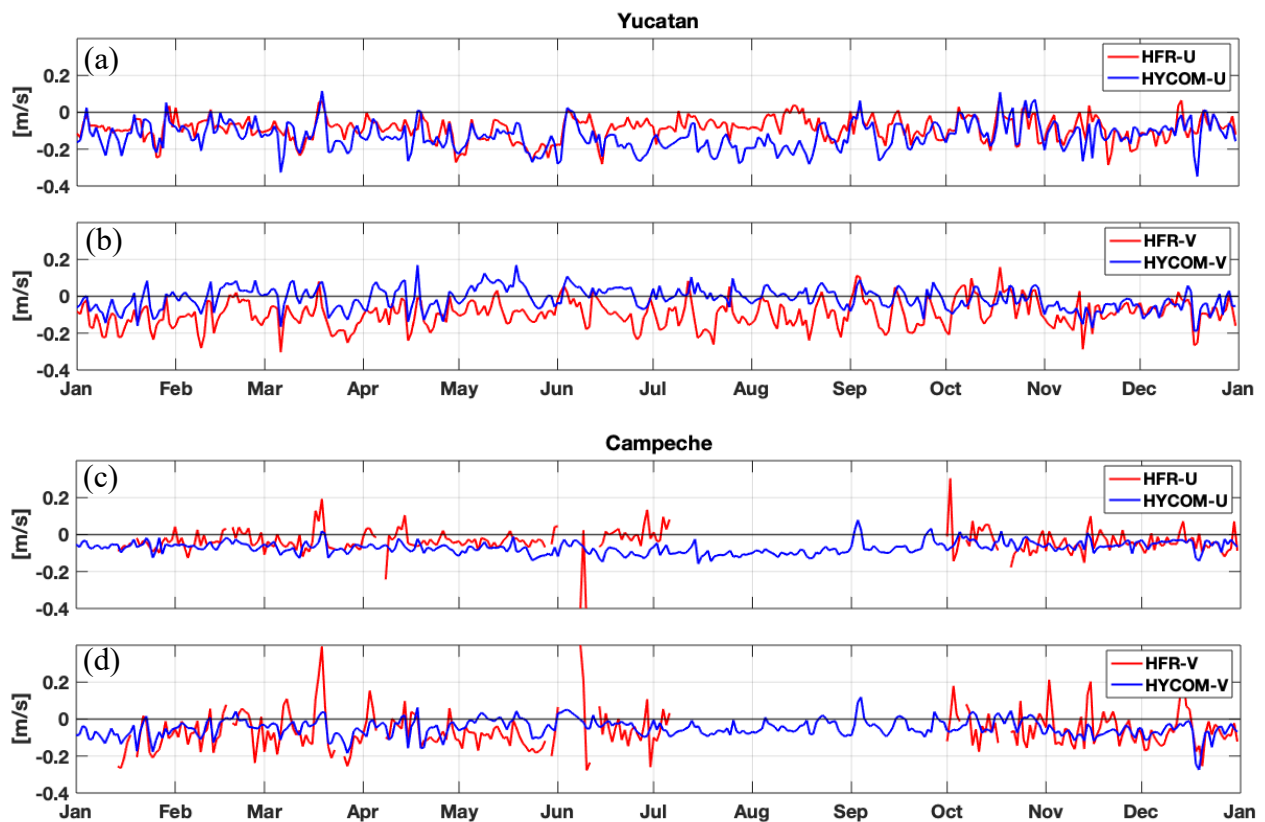


Figura 13. Series de tiempo para los datos del modelo HYCOM (color azul), y de los HFR (color rojo). a) Datos de la componente zonal y b) meridional de Yucatán, c) Datos de la componente zonal y d) meridional de Campeche.

A modo de conclusión, la comparación de los datos de radar HF con las distintas bases de datos, sugiere un buen acuerdo entre las fuentes. Cabe destacar que en particular la región del límite occidental de Yucatán, presenta rasgos muy distintos en los datos de HFR que, aunque coinciden bien con el ADCP anclado en Sisal, parecen no coincidir con el producto satelital de corrientes Geostroficas y con HYCOM. Sin embargo, si el origen de esta nueva estructura mapeada por los HFR es de carácter ageostrofico, pudiera esto explicar su ausencia en el producto satelital de SSH y a su vez en HYCOM, ya que es un modelo forzado con datos de gran escala de carácter geostrofico.

3.2. Descripción de la circulación superficial en la plataforma de Yucatán

3.2.1. Variabilidad Anual

La **Figura 14** muestra la circulación promedio del 2019, para los datos de HFR (vectores negros), y de temperatura superficial (gradiente de color), así como la zona de interés (asterisco verde) y tres de los sitios de radar utilizados en la PCCY. En el promedio anual se mostró una dirección hacia el oeste-suroeste entre Telchac y Sisal con velocidades promedio de $\sim 0.20 \text{ m s}^{-1}$, frente a Sisal se mostró un giro anticiclónico con velocidades mínimas de $\sim 0.05 \text{ m s}^{-1}$ y máximas de $\sim 0.10 \text{ m s}^{-1}$. Mientras que, en el límite occidental de Yucatán (entre Sisal e Isla Arena) se observó una bifurcación de las corrientes, una se mantiene en dirección hacia el oeste-noroeste que pareciera estar delimitada por la latitud de $\sim 21^\circ \text{ N}$ con velocidades de $\sim 0.18 \text{ m s}^{-1}$, y la otra sigue una dirección hacia el suroeste con intensidades menores de $\sim 0.15 \text{ m s}^{-1}$.

Respecto a la temperatura superficial, se observó que en promedio frente a Sisal y Telchac las temperaturas fueron mínimas de $\sim 26.6^\circ \text{ C}$ debidas a la fuerte influencia de las surgencias ocasionas frente a Cabo Catoche, entre Sisal e Isla Arena, donde se observa la probable bifurcación de las corrientes, las temperaturas son en promedio de $\sim 27.4^\circ \text{ C}$, mientras que, en las latitudes menores a Isla Arena (20.7° N) y en zonas alejadas de la costa ocurre un aumento en temperatura con máximos de 27.5° C , a diferencia de las zonas cercanas a las costas, donde las temperaturas aumentaron progresivamente hasta los $\sim 28.25^\circ \text{ C}$.

Cabe destacar, que parece existir una relación entre el gradiente de temperatura impuesto por la surgencia de Cabo Catoche y la ubicación del remolino anticiclónico frente a Sisal, ya que es precisamente en el límite occidental de la surgencia, donde parece generarse el remolino. Sin duda, es algo que se debe revisar a otras escalas temporales, ya que ambos procesos deben ser de variabilidades de días a semanas. El remolino aparece en el promedio anual seguramente debido a que su intensidad es mayor a la de la variabilidad típica de la zona.

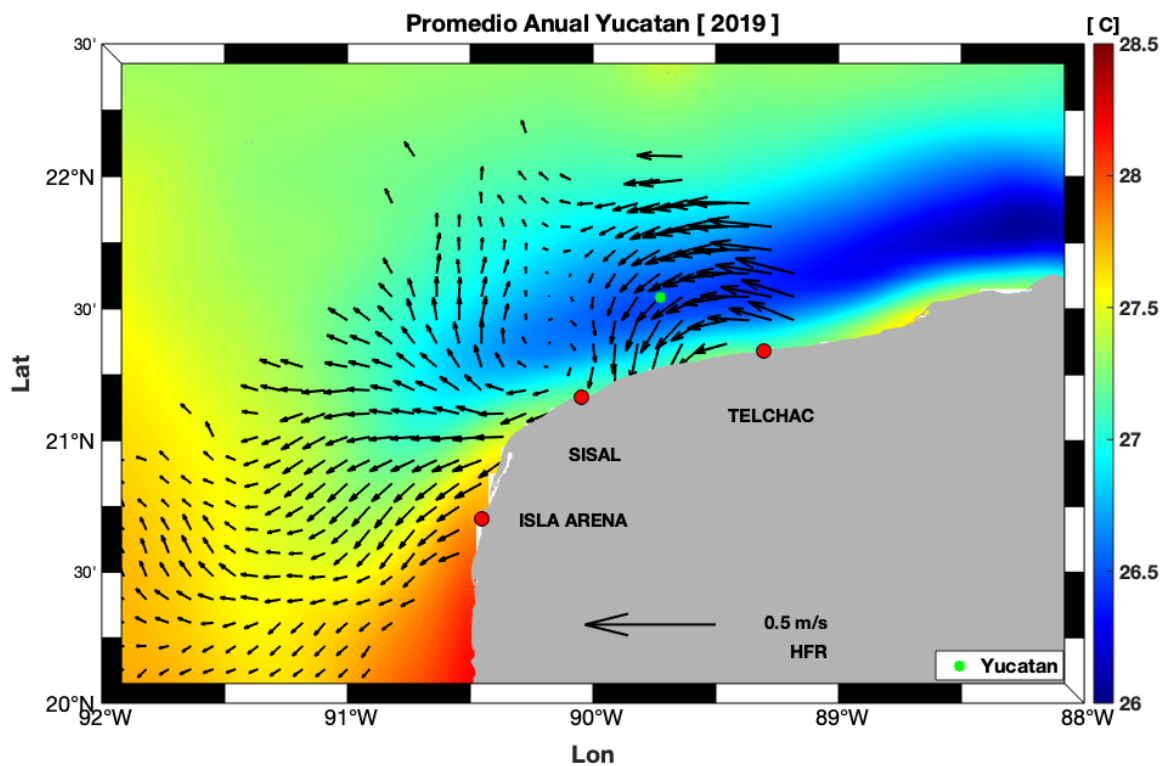


Figura 14. Corrientes superficiales promedio obtenidas de los HFR sobre las costas de Yucatán-Campeche con los vectores de dirección e intensidad (color negro), tres sitios del radar (puntos color rojo), la temperatura superficial obtenida de OSTIA (gradiente de color), y ubicación de la extracción de la serie de tiempo (punto color verde).

3.2.2. Variabilidad mensual

La **Figura 15** muestra los promedios mensuales del año 2019 de las corrientes totales obtenidas a partir de los radares HF sobre puestas con SST, los vectores de color negro indican la dirección e intensidad de las corrientes superficiales. En el periodo de estudio se observó que las corrientes superficiales se dirigieron hacia el oeste frente a las costas de Yucatán con intensificaciones durante los meses de primavera-verano, con velocidades máximas de $\sim 0.30 \text{ m s}^{-1}$ probablemente debidas a que el forzamiento principal es el viento, con direcciones hacia el oeste por los vientos alisios, mientras que durante el otoño-invierno las velocidades fueron menores de $\sim 0.15 \text{ m s}^{-1}$ debidas quizá a los efectos de los vientos nortes. En las costas de Sisal se observó el remolino anticiclónico durante casi todo el año, con intensidades mayores durante los meses de mayo a septiembre, y mínimas durante los meses de noviembre y diciembre, así como un ligero desplazamiento hacia el oeste, a pesar de que durante todo el año sus velocidades son mínimas ($\sim 0.05 \text{ m s}^{-1}$) se logró observar el giro anticiclónico. Al oeste de Sisal, en el límite oeste de Yucatán se observó la bifurcación durante casi todo el año, que indica que esta dinámica puede ser casi permanente al igual que el remolino anticiclónico, y frente a Campeche, por debajo de la latitud de 21° N , las corrientes medidas con los radares HF sugieren la presencia de la bifurcación entre Sisal e Isla Arena para la latitud ($\sim 20.3^\circ \text{ N}$) en las que una parte de las corrientes se dirigen hacia el noroeste y la otra hacia el suroeste.

De una manera general, los resultados de la circulación mensual, muestran una estacionalidad entre épocas de nortes y verano, que se refleja en la presencia de una pluma de aguas frías durante la primavera y verano, que a su vez está relacionada con las intensificaciones de la surgencia de Cabo Catoche frente a Yucatán. De forma general la circulación anual media (**Fig. 14**) mostró un flujo en dirección hacia el oeste durante casi todo el año frente a Yucatán, con una variabilidad influenciada por lo que pareciera ser un remolino anticiclónico, pero consistente con lo mencionado por autores como Ruiz-Castillo et al. (2016) y Jouanno et al. (2018), donde reportan corrientes con una dirección hacia el oeste frente a Yucatán.

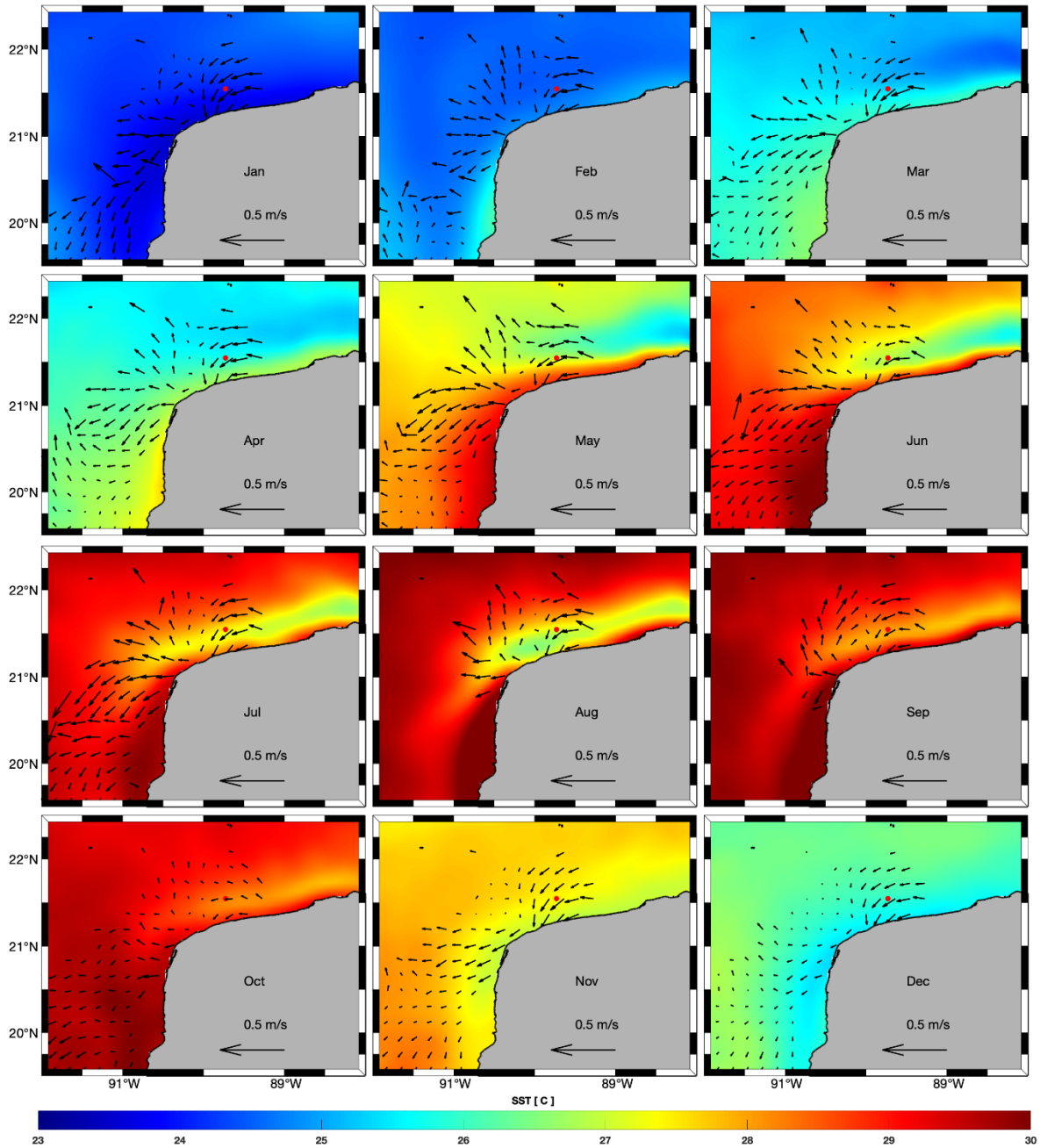


Figura 15. Climatología del 2019 en Yucatán, obtenidas de los radares de alta frecuencia, la dirección y magnitud de las corrientes superficiales están representadas por los vectores (color negro), y el punto rojo representa la zona de la extracción de la serie de tiempo (sitio de interés).

La **Figura 16** muestra las series de tiempo extraídas de las bases de datos de HFR y de viento (ERA5) de la zona de interés, los paneles a) y b) muestran las componentes zonal y meridional respectivamente, en ambas la línea azul representa la serie de tiempo del viento, y la roja de los radares de alta frecuencia. El primer rasgo interesante es la fuerte correlación entre el viento y la corriente, lo cual es de esperarse debido a que los HFR miden la capa límite de la superficie oceánica (< 1.5 m), sobre todo en los meses de invierno y en la componente meridional (norte-sur). También se aprecia que los vientos alisios dominan durante todo el año, esto se logró observar en ambos paneles, durante los periodos de mayo a septiembre en la componente zonal la dirección fue dominante hacia el oeste, mientras que en la componente meridional no hubo una dirección constante y presentó ligeras inversiones hacia el norte y sur.

A pesar de la influencia de los vientos alisios constantes durante todo el año, al observar las series de tiempo se puede notar que, durante los periodos de octubre a abril, en ambas componentes los cambios de signo y aumento en velocidades mostraron la presencia de los vientos nortes, para la componente zonal durante el periodo de otoño-invierno (octubre a abril) la dirección se mantuvo hacia el oeste, pero con ligeras inversiones de dirección e intensidad.

En el análisis de las series de tiempo, los resultados sugieren que las corrientes superficiales están influenciadas principalmente por el efecto del viento, ya que los datos de radares parecen tener una respuesta al comportamiento del viento, por ejemplo, de enero a marzo, en mayo, junio, agosto y octubre (en ambas componentes), la dirección resultante del análisis de las corrientes superficiales fue hacia el oeste-suroeste, con velocidades promedio de ~ 0.15 m s⁻¹, esto concuerda con autores como Ruiz-Castillo et al. (2016), en el que menciona que, durante agosto del 2007 a una profundidad de 20 m, el campo de velocidades muestra una circulación hacia el oeste con valores de ~ 0.2 m s⁻¹. Además, en el análisis del comportamiento del viento durante el otoño-invierno, el efecto de los vientos nortes, es coincidente con Kurczyn et al. (2021), donde mencionan que de septiembre a junio los frentes fríos atmosféricos que vienen de la parte continental de Norte América (Kurczyn et al., 2020), generan un cambio importante en la dirección del flujo del viento típico y que los vientos “nortes” aparecen con mayor intensidad y durante periodos cortos de tiempo.

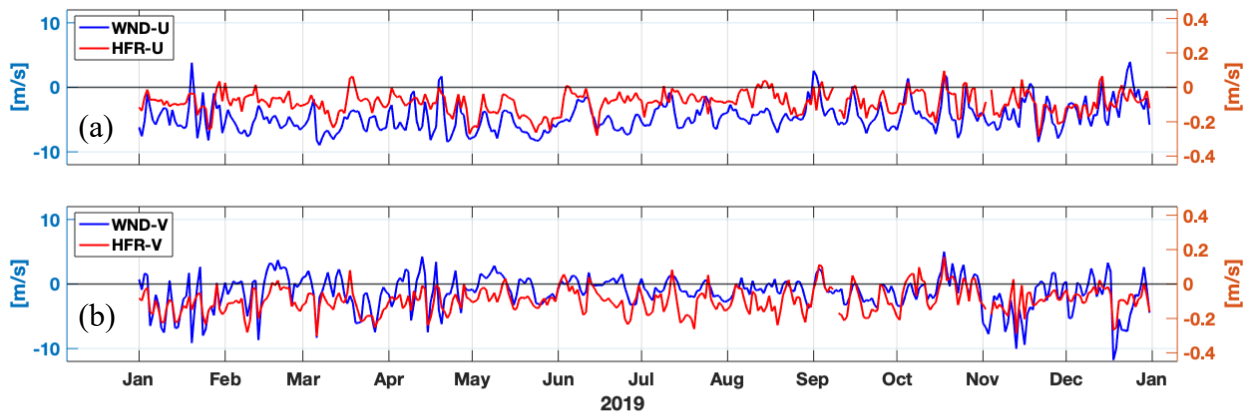


Figura 16. Series de tiempo de los datos de HFR (línea roja) y viento (línea azul) en Yucatán, a) componente zonal, y b) componente meridional.

3.2.3. Circulación sub-mensual y eventos de corta duración

Con el fin de identificar eventos de vientos intensos y cortos se presenta la **Figura 17** que muestra la serie de tiempo del viento frente a Yucatán (ver sitio de interés en **Fig. 15**) durante el 2019, los valores fueron elevados a la tercera potencia para resaltar los eventos nortes, la línea punteada color morado indica el límite inferior de los vientos con magnitudes $>5.5 \text{ m s}^{-1}$ ($>244.6 \text{ m/s}^3$), para ser definidos como vientos “nortes moderados” de acuerdo al Servicio Meteorológico Nacional (SMN), mientras que la línea punteada color rojo indica el límite inferior de los vientos con magnitudes $>10.83 \text{ m s}^{-1}$ ($>1270 \text{ m/s}^3$) que son clasificados como “nortes fuertes”.

De la serie de tiempo anual se observó que durante la primavera y verano las magnitudes se mantienen por debajo de los 10 m s^{-1} con variaciones semanales o quincenales, mientras que, durante el invierno y otoño debido a los vientos nortes las magnitudes fueron variantes. Frente a Yucatán, se observaron tres eventos nortes, uno durante los primeros días de marzo con magnitudes de $\sim 11.8 \text{ m s}^{-1}$ ($\sim 1643 \text{ m/s}^3$), el segundo durante el mes de noviembre con magnitud de $\sim 11 \text{ m s}^{-1}$ ($\sim 1331 \text{ m/s}^3$), y el tercero durante el mes de diciembre, este último fue el más intenso con magnitud de $\sim 12 \text{ m s}^{-1}$ ($\sim 1728 \text{ m/s}^3$).

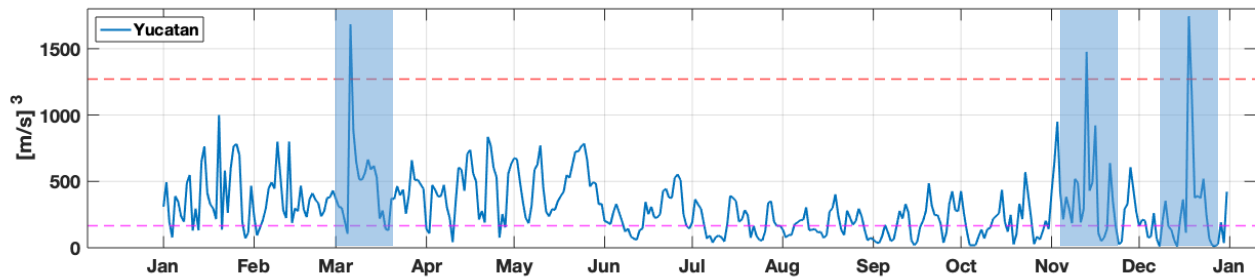


Figura 17. Serie de tiempo anual de la magnitud del viento (elevada a la tercera potencia) para Yucatán (color azul), la línea punteada color rojo representa el límite inferior de magnitud para clasificar los “nortes fuertes”, la línea punteada color magenta representa el límite inferior para clasificar los “nortes moderados”.

En el análisis de la circulación superficial medida con los radares HF para periodos con y sin viento durante el verano e invierno, la **Figura 18** muestra los datos de los radares HF (vectores color negro), viento (vectores color azul), y temperatura superficial del mar (gradiente de color) con promedios de cinco días, que permitieron identificar la circulación sub-mensual, de forma que no se vea afectada por la variabilidad diurna.

La **Figura 18a** muestra el promedio de cinco días durante un periodo de la primavera con viento, donde se observa que la dirección del viento y de las corrientes superficiales medidas con radares HF es hacia el oeste, además, se observa el remolino anticiclónico ligeramente al oeste de Sisal, así mismo se observa también la pluma de agua fría entre la latitud 21. 5° y 22° N, producto de la surgencia de Cabo Catoche que acarrea aguas frías del Caribe Mexicano hacia Yucatán. Durante el periodo de verano con viento escaso (**Fig. 18b**) se observó que las corrientes superficiales se mantienen en dirección hacia el oeste, y frente a Sisal nuevamente se observó el remolino anticiclónico con menor intensidad, además se observó también que la pluma de agua fría se expandió desde los 21. 2° N hasta los 22. 2° N. Los paneles a y b, mostraron una circulación durante primavera-verano con dirección hacia el oeste, un remolino anticiclónico frente a Sisal, la bifurcación de las corrientes entre Isla Arena y Sisal, y la presencia de la pluma de agua fría ocasionada por la surgencia de Cabo Catoche, así como su expansión.

En el análisis de la circulación para el periodo de invierno con viento la **Figura 18c** mostró un evento de viento norte, en el que el viento y los datos de radar HF indicaron una dirección hacia el sur-suroeste, el remolino anticiclónico frente a Sisal no se logró distinguir claramente, sin embargo, la circulación de las corrientes al oeste de Sisal pareciera indicar que hay una dirección hacia el este hasta la longitud de 90.25° W, para posteriormente dirigirse hacia el suroeste. Durante el periodo de invierno con viento escaso (**Fig. 18d**), la circulación se mantuvo hacia el suroeste, el remolino anticiclónico no se observó y los valores de viento ($\sim >$ de 5 m s^{-1}) y radar HF ($\sim >$ 0.2 m s^{-1}) fueron menores en comparación a cuando hubo presencia de viento. Los paneles c y d, mostraron una circulación durante el invierno con una dirección constante hacia el sur-suroeste, no hubo presencia del remolino anticiclónico frente a Sisal, ni de la pluma de agua fría ocasionada por las surgencias de Cabo Catoche.

De acuerdo con la **Figura 18**, es probable el forzamiento del remolino frente a Sisal tiene relación con la surgencia de Cabo Catoche y con el viento. Durante la primavera y verano tiene una influencia ocasionada por los vientos alisios que viajan en dirección hacia el oeste, mismos que favorecen fenómenos como la surgencia de Cabo Catoche, que acarrearán agua hacia el oeste por las costas de Yucatán, la cual probablemente tiene un efecto o favorece a la presencia del remolino anticiclónico de Sisal. Por el contrario, durante el invierno la presencia de los vientos nortes, aun en periodos de “relajación” del viento, pareciera que el remolino se desplaza hacia el oeste hasta la longitud 90.30° W, aunque con velocidades mínimas, o incluso pareciera hasta desvanecer el remolino anticiclónico.

Así mismo en cada uno de los paneles de la **Figura 18**, se muestran las series de tiempo del viento (línea color azul) y de los radares HF (línea color rojo) extraídas del nodo de interés con coordenadas 21.28° N y 90° W (indicado con una flecha morada), de las cuales se observó la variabilidad diurna que predomina en la zona, así como en el caso de la **Figura 18c**, las series de tiempo mostraron el efecto ocasionado sobre las corrientes superficiales medidas por radares HF durante un evento norte, por otra parte, cuando los vientos son escasos, las velocidades de las corrientes también fueron afectadas y disminuyeron su velocidad.

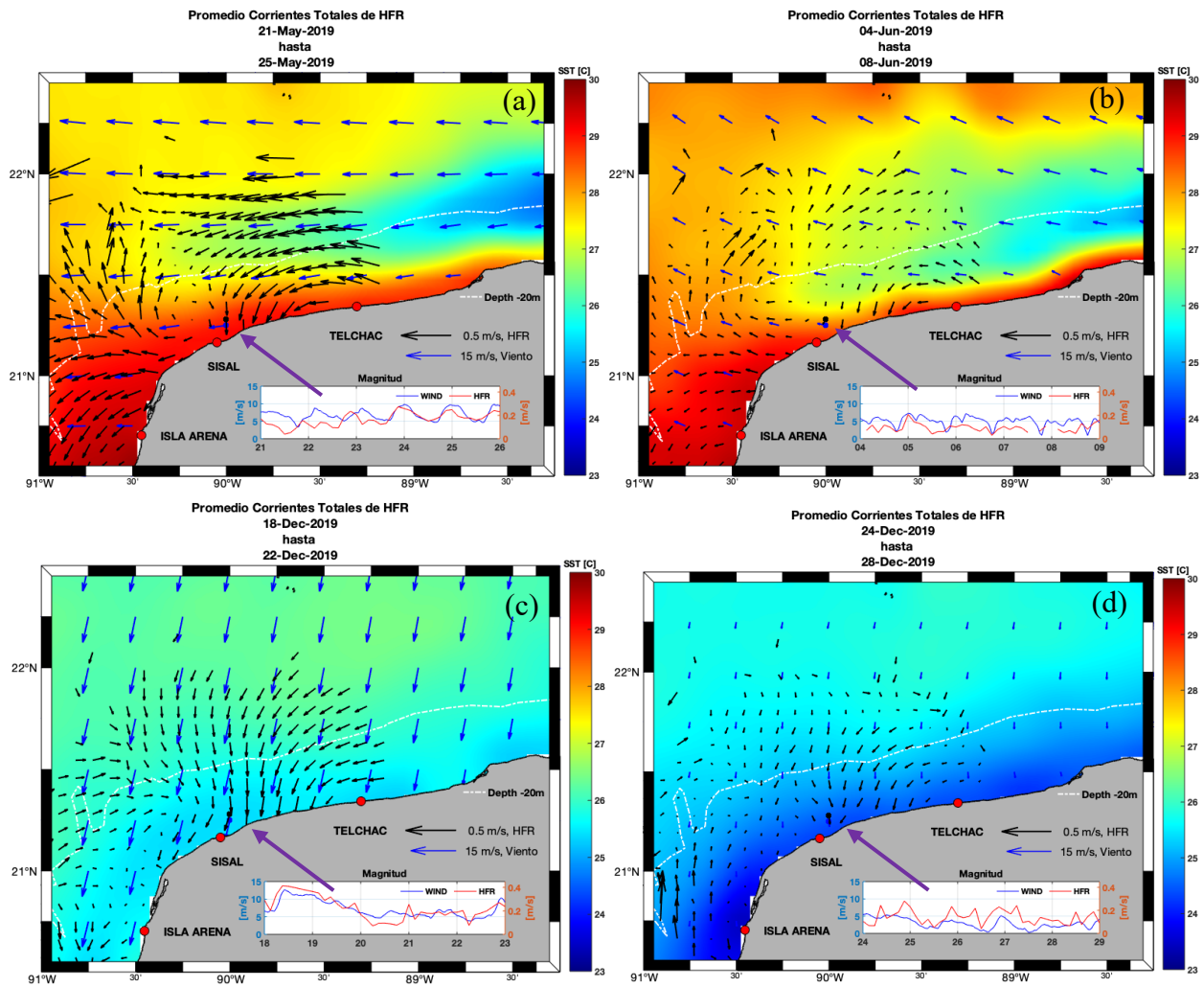


Figura 18. Promedio de cinco días de la circulación superficial medida con los radares HF (representado por vectores negros), viento (vectores azules) y temperatura superficial (gradiente de color), en asteriscos se muestra la ubicación de la extracción de las series de tiempo (asterisco negro para los HFR y azul para el viento) y la línea blanca punteada representa la isobata de los 20 m de profundidad.

3.2.4. Circulación durante Nortes

La **Figura 19** muestra las series de tiempo cada 3 horas, extraídas de la malla del viento ERA5 para la ubicación de Yucatán (ver zona de interés en **Fig. 19**), y la dirección del viento (hacia dónde va) en grados (orientación náutica, desde 0 hasta 360° en sentido de las manecillas del reloj,

partiendo desde el norte). El periodo de análisis utilizado fue durante el mes de diciembre, en la temporada de mayores eventos nortes que es invierno.

Respecto a la dirección del viento se logró observar que durante los primeros 13 días, los vientos alisios se dirigen hacia el oeste con una variación diurna, durante el día 14 de diciembre hubo una relación de los vientos con magnitudes casi nulas. En los días posteriores del 15 al 18 se observó una dirección de $\sim 300^\circ$ (hacia el noroeste) y de manera casi constante, este comportamiento se puede asociar a los eventos de suradas (típicamente antes de eventos nortes) con una magnitud de $\sim 8 \text{ m s}^{-1}$ (512 m/s^3), durante el día 17 de diciembre sucede nuevamente el cambio de dirección del viento y la magnitud es cercana a cero. Durante los días del 18 al 20 de diciembre se observó el evento norte, con magnitudes máximas de $\sim 14.23 \text{ m s}^{-1}$ ($\sim 2880 \text{ m/s}^3$) y direcciones de $\sim 200^\circ$ que indican un sentido hacia sur, en los días posteriores (del 20 al 25 de diciembre) la dirección se mantuvo hacia el sur-sureste con magnitudes de $\sim 8 \text{ m s}^{-1}$ hasta el día 23, donde ocurre nuevamente otro evento norte, pero de menor intensidad con magnitudes de $\sim 11 \text{ m s}^{-1}$ ($\sim 1131 \text{ m/s}^3$). Durante los días posteriores a los dos eventos nortes la dirección del viento volvió a ser hacia el oeste debido a los vientos alisios y con magnitudes de $\sim 5 \text{ m s}^{-1}$ ($\sim 125 \text{ m/s}^3$).

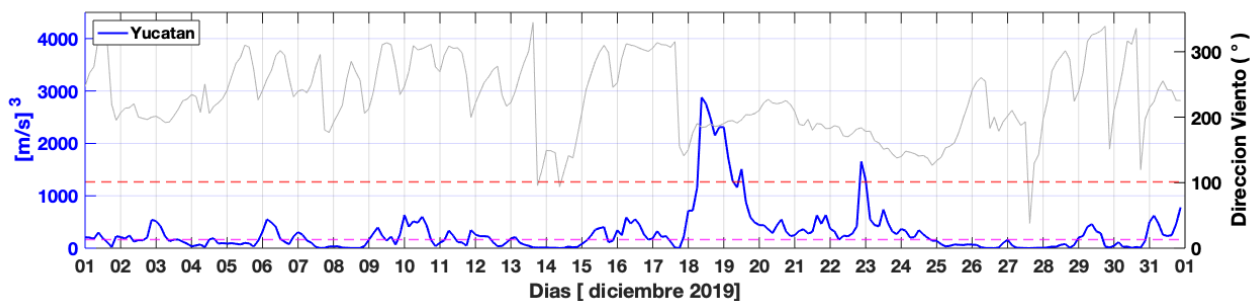


Figura 19. Serie de tiempo de la magnitud del viento (elevada a la tercera potencia) para Yucatán (color azul), y su dirección en grados (color gris), la línea de color rojo representa el límite inferior de magnitud para clasificar “nortes fuertes”, la línea punteada color magenta representa el límite inferior de la magnitud para clasificar los “nortes moderados”.

La **Figura 20** muestra mapas sinópticos de las corrientes superficiales medidas con radares HF (color negro), y del viento (color azul), así como la ubicación del ADCP de Sisal (color magenta) durante dos eventos nortes que cubren desde el 17 hasta el 24 de diciembre, en la parte inferior derecha se muestra la serie de tiempo de las magnitudes del viento (color azul), de los HFR (color rojo), y del ADCP (color magenta) así como el punto (de color respectivo a cada variable) de ubicación del tiempo sobre la serie de tiempo. De las series de tiempo se obtuvo el coeficiente de correlación vectorial con valor de 0.5834, probablemente debido a la ausencia de algunos datos, entre ellos los que suceden durante el primer evento norte durante el 18 de diciembre en el que la falta de datos puede asociarse a algunos aspectos como la lluvia, corte de energía eléctrica, entre otros.

La circulación frente a Yucatán antes, durante y posterior al evento norte, se puede describir como, horas o un par de días antes del evento (a), pareciera existir la presencia de las suradas, en las que la dirección del viento se dirigió hacia el noroeste, modificando la dirección de las corrientes superficiales hacia el norte-noroeste, durante el evento norte (b) y (c) se notó que las magnitudes son máximas con una dirección constante hacia el sur en ambas fuentes de datos, frente a Sisal parece que las corrientes superficiales convergen y se dirigen hacia la costa, esto se puede asociar a la inversión de la dirección ocasionada por los eventos nortes. Posterior al evento (d) las corrientes y el viento volvieron a su estado típico con direcciones hacia el suroeste, y frente a Sisal, los datos de radar mostraron un semi-remolino anticiclónico que se difumina con el paso del tiempo.

Posterior al evento norte del 18 de diciembre sucede otro evento norte durante el día 23 de diciembre, pero de menor intensidad y se puede observar en los paneles (e) y (f), donde las corrientes superficiales se mantienen en dirección hacia el sur-suroeste.

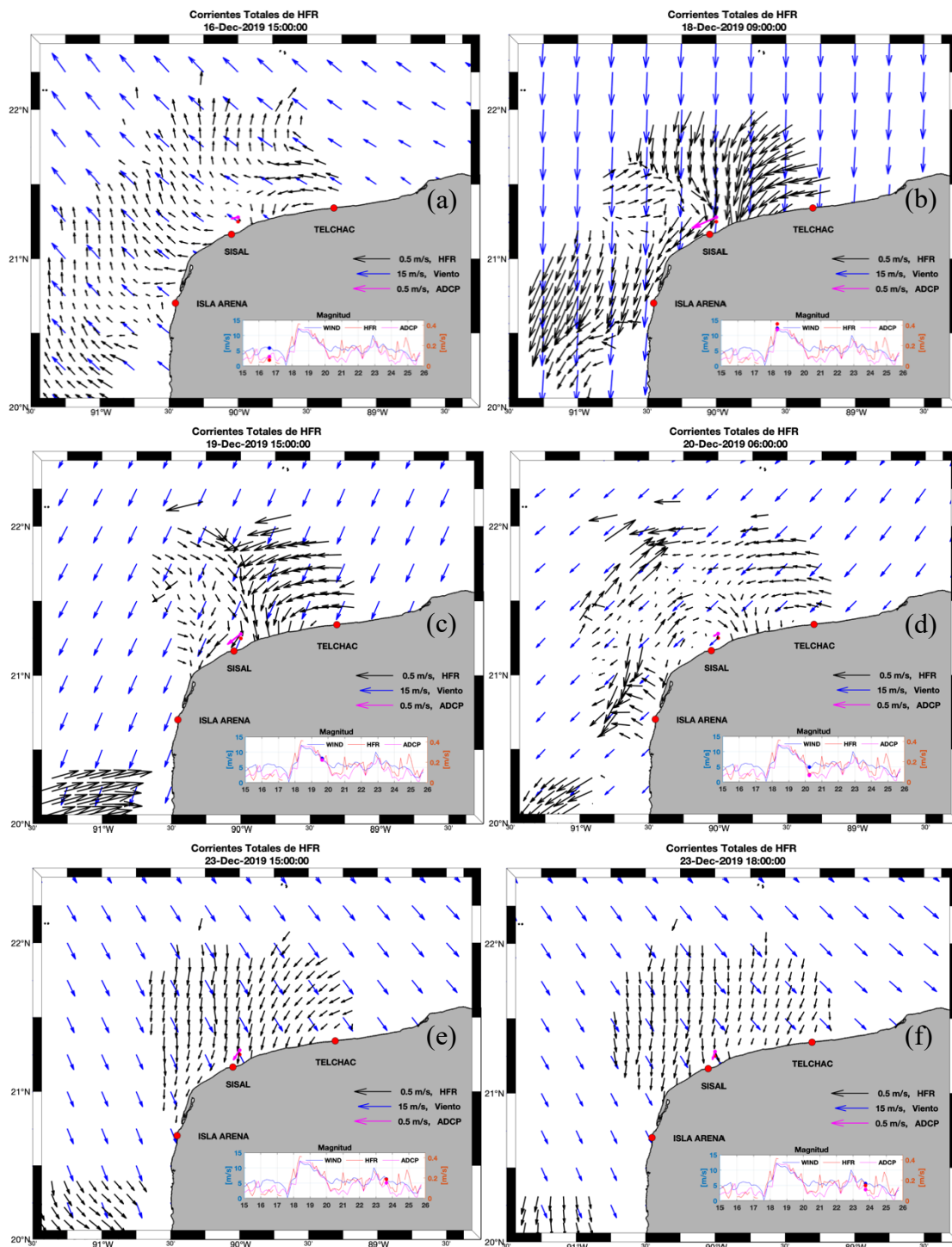


Figura 20. Mapas sinópticos de las corrientes superficiales medidas de HFR (color negro) durante eventos de vientos nortes (color azul), así como la ubicación del ADCP de Sisal (color magenta) en diciembre de 2019. En la esquina inferior derecha se muestran las series de tiempo de las variables de viento (color azul), de los radares HF (color rojo) y del ADCP (color magenta).

3.3. Descripción de la circulación superficial en la plataforma de Campeche

3.3.1. Variabilidad Anual

La **Figura 21** muestra la circulación promedio del 2019 para los datos de HFR (vectores negros), y de temperatura superficial (gradiente de color), así como la zona de interés (asterisco magenta) y dos de los sitios de radar utilizados frente a Campeche. Los resultados obtenidos sugieren una dirección hacia el suroeste durante todo el año con velocidades promedio de $\sim 0.10 \text{ m s}^{-1}$, que concuerdan con los resultados obtenidos por autores como Martínez-López y Parés-Sierra (1998), Romero-Centeno et al. (2021) y Kurczyn et al. (2021) donde mencionan la presencia de una dirección hacia el suroeste en la parte occidental de la Península de Yucatán con velocidades que oscilan entre los 0.07 y 0.18 m s^{-1} .

Respecto a la temperatura superficial, se observaron valores de $\sim 27.7^\circ \text{ C}$ en aguas alejadas de la costa ($\sim 40 \text{ km}$) y valores más cálidos de $\sim 28.2^\circ \text{ C}$ cercanas a las costas. En comparación con Yucatán, las temperaturas en Campeche son más cálidas en $\sim 1.5^\circ \text{ C}$, esto probablemente sea debido a que frente a Sisal y Telchac se tienen registros de agua frías de surgencia durante primavera y verano, las aguas de surgencia frías que vienen del Caribe bajan la temperatura superficial frente a Yucatán, mientras que frente a Campeche la influencia de las surgencias de Cabo Catoche ya no es tan notoria, y debido a la poca profundidad de la zona, las aguas comienzan a elevar sus temperaturas.

Cabe destacar, que el promedio anual de circulación frente al estado de Campeche, sugiere una bifurcación de las corrientes superficiales, dicha divergencia sucede en las coordenadas $\sim 20^\circ \text{ N}$ y 91.29° W , en las que una parte se dirige hacia el oeste, mientras que la otra se dirige hacia el suroeste, de la cual, los resultados aluden a que la corriente costera es un sistema que sigue la línea de costa. Las corrientes al norte de Campeche se dirigen hacia el oeste-suroeste como influencia de las corrientes de las costas de Yucatán, en la región central (Lerma-Champotón) las corrientes se dirigen hacia el suroeste o sureste como posible resultado de la línea de costa, mientras que la circulación al sur de Campeche (Sabancuy- cd del Carmen) se dirige hacia el suroeste siguiendo la línea de costa.

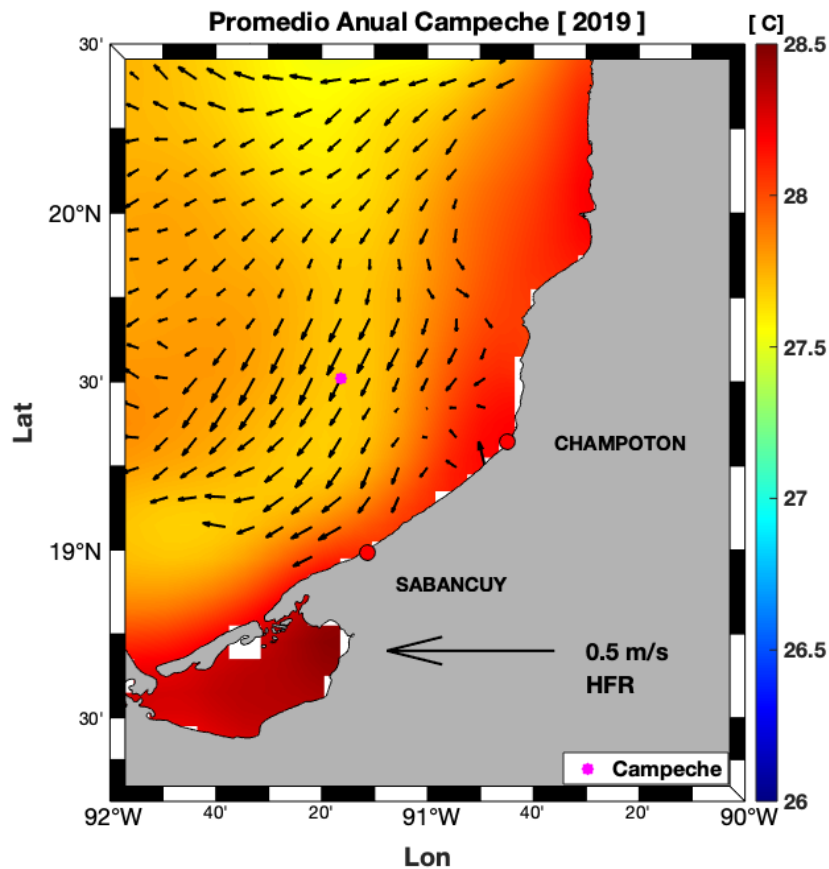


Figura 21. Corrientes superficiales promedio obtenidas de los HFR sobre las costas de Campeche con los vectores de dirección e intensidad (color negro), dos sitios del radar (puntos color rojo), la temperatura superficial obtenida de OSTIA (gradiente de color), y ubicación de la extracción de la serie de tiempo (punto color verde).

3.3.2. Variabilidad mensual

La **Figura 22** muestra los promedios mensuales del año 2019 de las corrientes totales obtenidas a partir promedios diarios de HFR, los vectores negros indican la dirección e intensidad de las corrientes superficiales, y de color rojo se muestra la zona de interés de la cual se obtuvieron las series de tiempo de las variables de HFR, viento y SST. Las corrientes superficiales durante el periodo de estudio mostraron una dirección dominante hacia el suroeste con intensificaciones durante el otoño-invierno con velocidades máximas de $\sim 0.20 \text{ m s}^{-1}$ probablemente debidas a los vientos nortes que viajan hacia el sureste, mientras que en primavera-verano las velocidades fueron

menores con valores de $\sim 0.10 \text{ m s}^{-1}$, esto pudiera explicarse a que los vientos alisios no mostraron tanta influencia como frente a Yucatán debido a la ubicación y forma de la Península de Yucatán, en la que la componente zonal del viento es la que domina frente a Yucatán, y la componente meridional en Campeche.

Los resultados de la circulación anual medida con los radares HF sugieren una circulación media en dirección hacia el suroeste durante todo el año frente a Campeche, esto es consistente con autores como Martínez-López y Parés-Sierra (1998) y Kurczyn et al. (2021), en los que demuestran velocidades de entre $0.05\text{-}0.17 \text{ m s}^{-1}$ para Campeche. Kurczyn et al. (2021) mencionan que en julio del 2018 el promedio de velocidades frente a Champotón y Chenkan oscila entre 0.07 y 0.18 m s^{-1} , resultados que son comprables con los datos de HFR donde las velocidades máximas ($\sim 0.20 \text{ m s}^{-1}$) y mínimas ($\sim 0.05 \text{ m s}^{-1}$) varían de acuerdo a la estacionalidad.

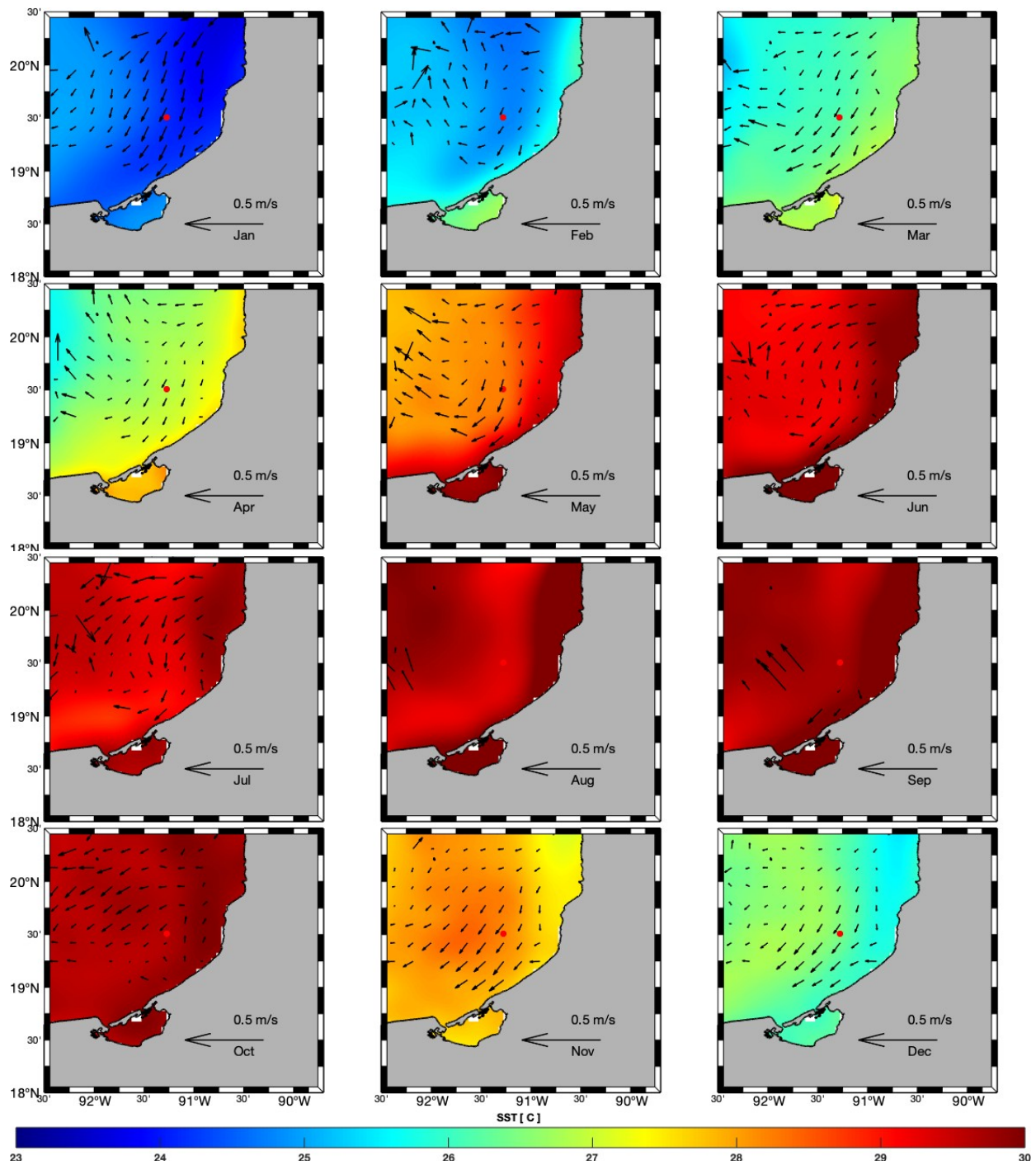


Figura 22. Climatología del 2019 en Campeche, obtenidas de los radares de alta frecuencia, la dirección y magnitud de las corrientes superficiales están representadas por los vectores (color negro), y el punto rojo representa la zona de la extracción de las series de tiempo.

La Figura 23 muestra las series de tiempo extraídas las bases de datos de HFR y de ERA5 de la zona de interés, los paneles (a) y (b) muestran las componentes zonal y meridional respectivamente, en ambas la línea azul representa la serie de tiempo del viento, y la roja de los radares de alta frecuencia. Para la componente zonal se observó en ambas bases de datos, que los valores promedio son negativos, que indicaron una dirección de las corrientes superficiales y del viento hacia el oeste durante casi todo el año, mientras que en la componente meridional no hubo una dirección constante y mostró ligeras inversiones hacia el norte y sur.

La magnitud de los vientos alisios frente a Campeche no tiene mayor influencia como en el caso de Yucatán durante la primavera y verano, sin embargo, debido a que la línea de costa está orientada norte-sur, los vientos nortes favorecen el aumento en la velocidad de las corrientes superficiales debido a su gran intensidad, e inducen una dirección de corrientes paralelas a la costa.

En el análisis de las series de tiempo de Campeche, la ausencia de datos de radar durante los meses de julio a septiembre dejó un espacio libre sin resolver, sin embargo, en el resto de los datos se logró observar el efecto que tienen los vientos sobre la superficie oceánica, por ejemplo, intensificaciones que se observaron en ambas fuentes de datos, como en el mes de febrero-marzo, y noviembre-diciembre. Los resultados sugieren que la dirección de las corrientes superficiales fue hacia el suroeste, con velocidades promedio de $\sim -0.1 \text{ m s}^{-1}$, que concuerdan con lo mencionado por autores como Expósito-Díaz et al. (2009) donde utiliza correntímetros Aandera en cuatro anclajes, y sus resultados fueron velocidades de ~ 0.10 a $\sim 0.20 \text{ m s}^{-1}$ frente a Isla de Carmen, y Kurczyn et al. (2021) donde mencionan que en julio del 2018 el promedio de velocidades frente a Campeche y Chenkan oscila entre 0.07 y 0.18 m s^{-1} .

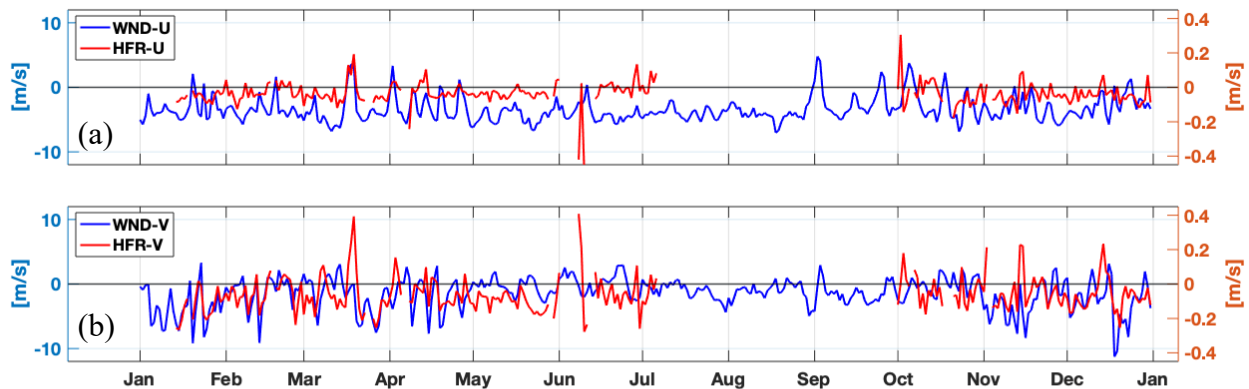


Figura 23. Series de tiempo de los datos de HFR (línea roja) y viento (línea azul) en Campeche. a) componente zonal, y b) componente meridional.

3.3.3. Circulación sub-mensual y eventos de corta duración

La **Figura 24** muestra la serie de tiempo anual del viento frente a Campeche (ver sitio de interés en **Fig. 22**), en la que se utilizó la misma metodología descrita para la **Figura 17**. En el análisis del viento se observó que, frente a Campeche durante la primavera y verano, las magnitudes fueron menores de los 8 m s^{-1} (512 m/s^3) con variaciones semanales o quincenales, mientras que, durante el invierno y otoño los vientos nortes alcanzaron máximos de $\sim 11 \text{ m s}^{-1}$ (1331 m/s^3) en el mes de diciembre. Otro aspecto a resaltar, es que, al comparar las series de tiempo de Campeche y Yucatán, se logró observar las variaciones espaciales que tiene el viento, ya que eventos nortes en Yucatán como los que suceden en marzo y noviembre, no tuvieron el mismo impacto en Campeche, mientras que, el evento norte de diciembre, si impactó en ambos estados con magnitudes similares, $\sim 11 \text{ m s}^{-1}$ en Campeche y $\sim 12 \text{ m s}^{-1}$ en Yucatán.

Este tipo de análisis permitió observar que el viento a pesar de ser sinóptico de gran escala, tiene variaciones espaciales, pero no temporales, es decir, algunos eventos nortes como los que se observan en Yucatán durante marzo, noviembre y diciembre, se observan a la par frente a Campeche, sin embargo, las magnitudes fueron diferentes, el impacto del viento es mayor en Yucatán que en Campeche. Además, la variación espacial depende del evento norte, como fue el

caso del evento durante el mes de diciembre, en el que la presencia de los vientos fue de magnitudes similares e impactó en ambos sitios.

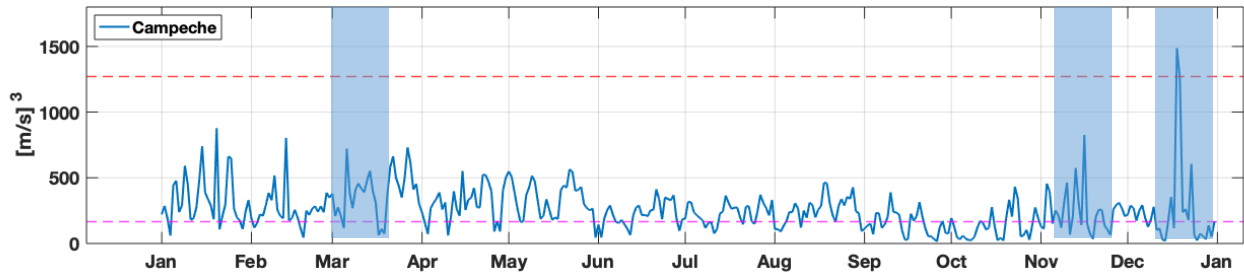


Figura 24. Series de tiempo anual de la magnitud del viento (elevada a la tercera potencia) para Campeche (color azul), la línea punteada color rojo representa el límite inferior de magnitud para clasificar los “nortes fuertes”, la línea punteada color magenta representa el límite inferior para clasificar los “nortes moderados”.

En el análisis de la circulación superficial medida con los radares HF durante periodos de primavera e invierno con y sin viento, la **Figura 25** muestra la malla de datos de los radares HF (vectores color negro), viento (vectores color azul) y temperatura superficial del mar (gradiente de color), con promedios de cinco días (misma clasificación descrita en la **Fig. 18**).

La **Figura 25a** muestra el promedio de la circulación durante el periodo de primavera con viento escaso, donde se observó que las corrientes superficiales no son intensas y en latitudes por encima de Champotón, pareciera que no hubo una dirección dominante, lo cual es consistente con lo mostrado anteriormente por la elipse de variabilidad del ADCP de Lerma (**Fig. 6**), mientras que la circulación por debajo de la latitud 19.25° N, pareciera tener una dirección hacia el suroeste, ajustándose a la línea de costa. Durante el periodo de primavera con viento (**Fig. 25b**), la circulación es similar, sin embargo, frente a Lerma/Campeche pareciera haber una disminución de las corrientes, y por debajo de la latitud 19.80° N, las corrientes se intensifican y tienen una dirección hacia el suroeste, al observar el mapa sinóptico, se puede apreciar como la corriente costera “serpentea” de forma que parece seguir la línea de costa.

En el análisis de la circulación para el periodo de invierno con viento, la **Figura 25c** muestra el mismo evento de viento norte mostrado en la **Figura 18c**, sin embargo, en el estado de Campeche la circulación mostró una dirección hacia el sur-suroeste, en la que se observó que la corriente “serpentea” por la ciudad de Campeche, y al llegar a Champotón y Sabancuy las corrientes se ajustan a la línea de costa en dirección hacia el suroeste. Durante el periodo de invierno con viento escaso (**Fig. 25d**), en latitudes mayores a 19.5° N, las corrientes mostraron una dirección cambiante, que es consistente con los resultados mostrados en el ADCP de Lerma, en el que, a pesar de no coincidir temporalmente, los resultados sugieren una dinámica de circulación variable frente a la ciudad de Campeche, mientras que las corrientes frente a Champotón y Sabancuy sugieren una dirección de corrientes hacia el suroeste.

Así mismo en cada uno de los paneles de la **Figura 25**, se muestra una serie de tiempo del viento (línea color azul) y de los radares HF (línea color rojo), extraídas del nodo con coordenadas 19.5° N y 91.25° W (indicado con una flecha morada), de las cuales se observó la variabilidad diurna que predomina en la zona, así como en el caso de la **Figura 25c**, se muestra el efecto que tuvo el evento norte sobre las corrientes superficiales medidas por radar HF. Mientras que, durante los vientos escasos, las corrientes superficiales también se ven afectadas, y disminuyen su velocidad.

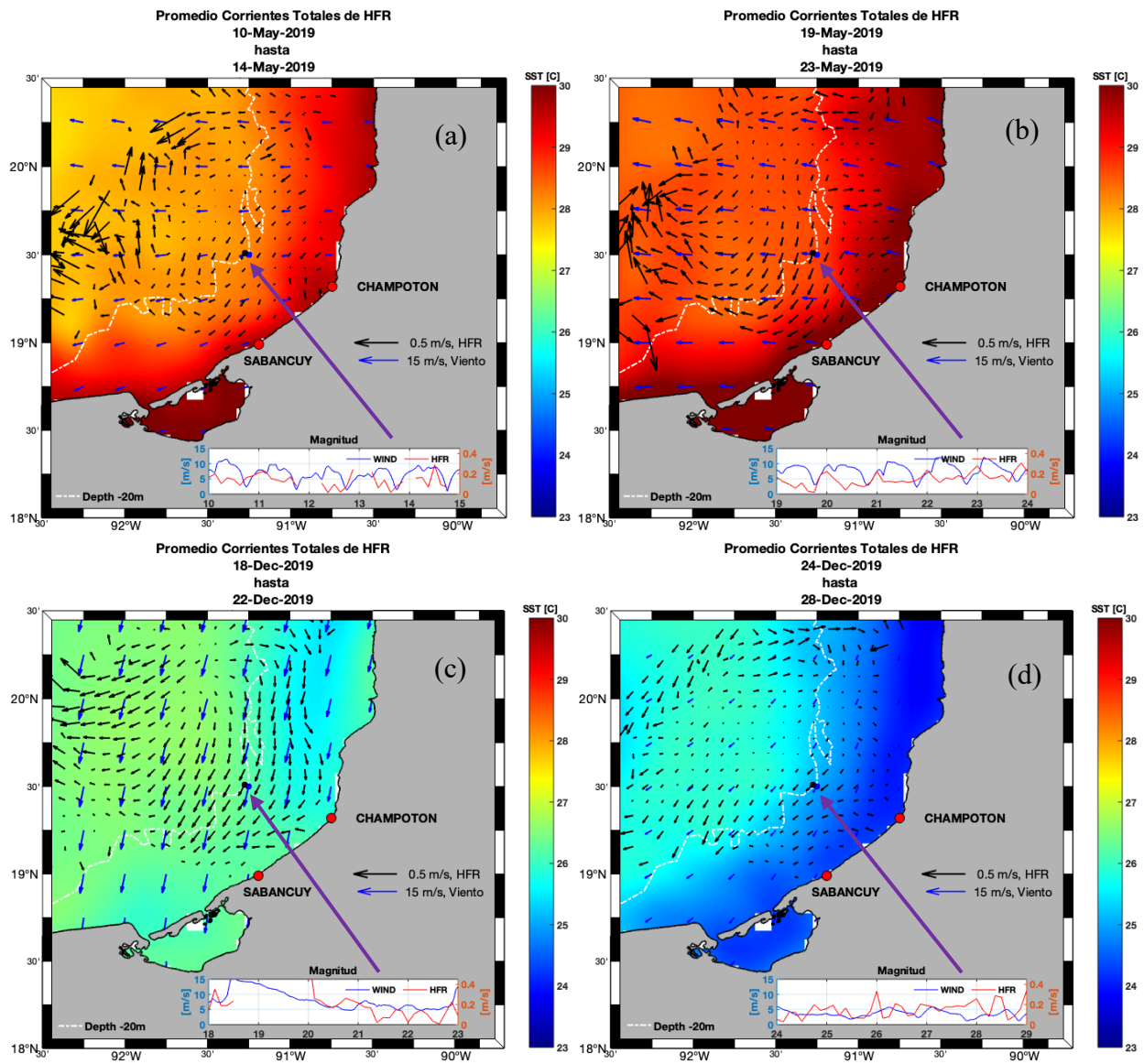


Figura 25. Promedio de cinco días de la circulación superficial medida con los radares HF (representado por vectores negros), viento (vectores azules) y temperatura superficial (gradiente de color), en asteriscos se muestra la ubicación de la extracción de las series de tiempo (asterisco negro para los HFR y azul para el viento) y la línea blanca punteada representa la isobata de los 20 m de profundidad.

3.3.4. Circulación durante Nortes

La **Figura 26** muestra las series de tiempo cada 3 horas, extraídas de la malla del viento ERA5 para la ubicación de Campeche (ver zona de interés en **Fig. 25**). Al igual que en Yucatán, el periodo de análisis utilizado fue invierno, que es la temporada de mayores eventos nortes, con el fin de identificar eventos de vientos intensos, se utilizó la misma metodología descrita en la sección 3.2.4. El evento más intenso en Campeche fue también durante los días del 18 al 19 de diciembre, en los que se alcanzaron magnitudes máximas de $>16.25 \text{ m s}^{-1}$ (4289 m/s^3).

Al observar las series de tiempo de Campeche y Yucatán, los resultados sugieren que los vientos nortes tienen un efecto sobre todo el GoM, sin embargo, el efecto no es homogéneo, esto es consistente con autores como Kurczyn et al. (2020), donde mencionan que el impacto de los vientos “nortes” no es uniforme, sino que tiene afectaciones espaciales sobre el océano.

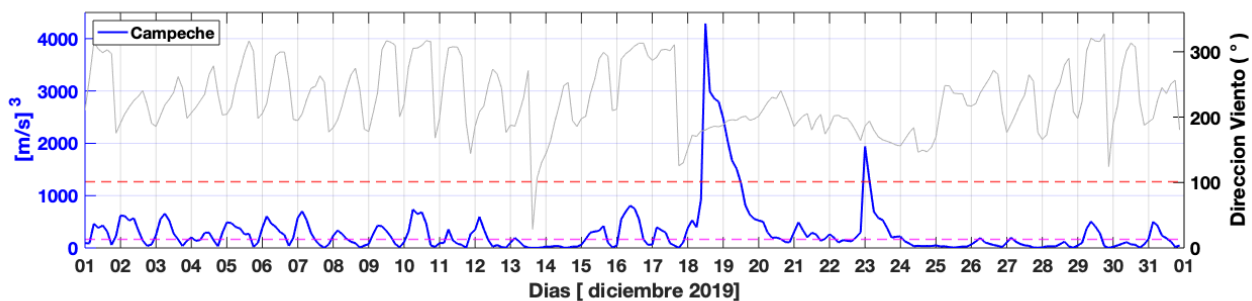


Figura 26. Serie de tiempo de la magnitud del viento (elevada a la tercera potencia) para Campeche (color azul), su dirección en grados (color gris), la línea de color rojo representa el límite inferior de magnitud para clasificar “nortes fuertes”, la línea punteada color magenta representa el límite inferior de la magnitud para clasificar los “nortes moderados”.

La **Figura 27** muestra mapas sinópticos de las corrientes superficiales medidas con HFR (color negro), y del viento (color azul) durante dos eventos nortes que cubren desde el 17 hasta el 24 de diciembre, en la parte inferior derecha se muestra la serie de tiempo de las magnitudes del viento (color azul) y de los HFR (color rojo), así como el punto (de color respectivo a cada variable)

de ubicación del tiempo sobre la serie de tiempo. De las series de tiempo se obtuvo el coeficiente de correlación vectorial de 0.3818, probablemente debido a la ausencia de algunos datos, al igual que en Yucatán durante el evento norte del 18 al 20 de diciembre.

La dinámica que ocurre en Campeche antes, durante y posterior al evento norte de diciembre, es lo que pareciera ser la presencia de una surada (a), estas ocurren típicamente antes de un evento norte y tienen una dirección del viento hacia el noroeste, y pueden modificar las corrientes superficiales en la misma dirección, durante el evento norte (b) y (c) las direcciones y magnitudes son máximas hacia el sur-suroeste, permitiendo que las corrientes se muevan paralelas a la costa. Posterior al evento norte (d) las corrientes superficiales y el viento volvieron a su estado típico con direcciones hacia el suroeste y de menor intensidad.

Posterior al evento norte del 18 de diciembre, sucede otro evento norte durante el día 23 de diciembre, pero de menor intensidad, se observa que durante el día mencionado, en el panel (e) el viento mostró una dirección hacia el sur, y las corrientes superficiales hacia el suroeste, y para el panel (f) se muestran los datos posteriores al evento norte, en el que el viento mantuvo una dirección hacia el sureste, mientras que, las corrientes superficiales mantuvieron una dirección hacia el suroeste, esta dinámica está asociada a la forma de curvatura que presenta la costa de Campeche.

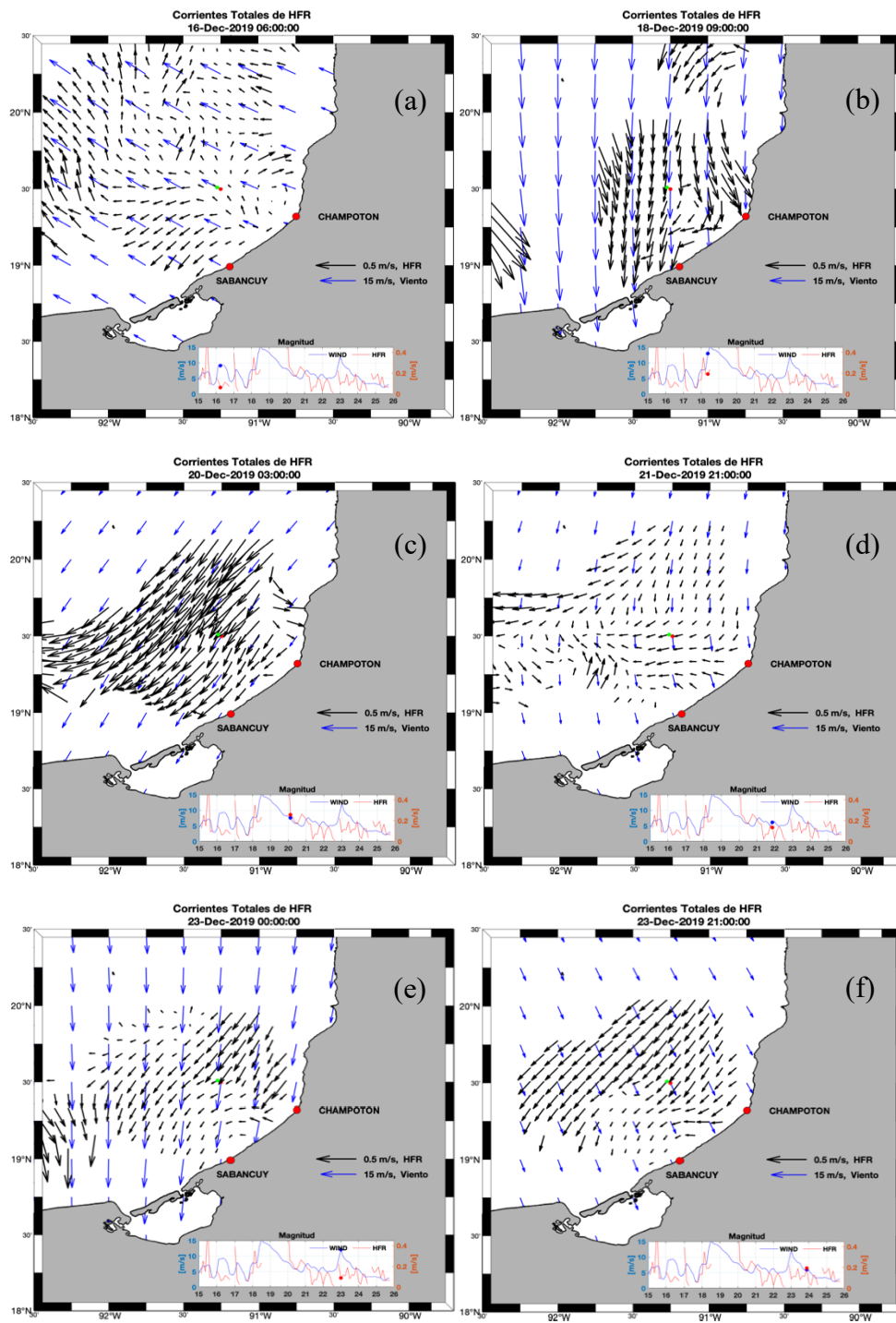


Figura 27. Mapas sinópticos de las corrientes superficiales medidas de HFR (color negro) durante eventos de vientos nortes (color azul) durante diciembre de 2019, ubicación de la extracción de series de tiempo de ambas variables (punto color verde). En la esquina inferior derecha se muestran las series de tiempo de las variables de viento (color azul) y de HFR (color rojo).

3.4. Circulación regional entre Campeche-Yucatán

Una vez descrita la circulación medida con los radares HF y comparada con productos satelitales, modelaciones y correntímetros, se logró observar que existe una regionalización de las corrientes superficiales sobre la Plataforma Costera de Campeche-Yucatán. Las corrientes superficiales en Yucatán se dirigen hacia el oeste, frente a Sisal los radares HF mostraron un remolino anticiclónico durante una gran parte del año, con mayor intensidad durante la primavera-verano. Al oeste entre Sisal e Isla Arena la dinámica superficial fue distinta, una bifurcación de las corrientes divide la circulación, una con dirección hacia el noroeste, mientras que la otra se dirige hacia el suroeste, esta circulación puede ser explicada debido al cambio en la orientación de la costa y al gradiente de temperatura impuesto por la surgencia de Cabo Catoche.

Frente a Campeche las corrientes mostraron una parte de la bifurcación entre Sisal e Isla Arena, a los ($\sim 20.3^\circ$ N) entre Isla Arena y la ciudad de Campeche, una en dirección hacia el oeste-noroeste y otra en dirección hacia el suroeste, la cual, pareciera indicar que existe un “serpenteo” de las corrientes que se ajustan a la forma de la línea de costa, misma que continua hasta Tabasco.

Se sugiere que entre estas dos regiones la conectividad es media, debido a que las velocidades son mayores en Yucatán y con dirección hacia el oeste típicamente, mientras que en Campeche las velocidades son menores y con una dirección típica hacia el suroeste, esto probablemente se deba a la forma y al cambio en la línea de la costa de la Península de Yucatán, que induce a que haya una bifurcación en el límite occidental (entre Sisal e Isla Arena) que distribuya la velocidad y dirección, de forma que frente a Campeche las corrientes superficiales sean de menor intensidad y diferente dirección que en Yucatán. Sin embargo, aun hace falta realizar más estudios que puedan demostrar la conectividad entre ambas regiones.

Así como las corrientes superficiales mostraron circulaciones diferentes, el viento que es el principal forzamiento en zonas someras, tiene un efecto espacial en la PCCY, en las que pareciera depender de la intensidad y dirección, un ejemplo son los eventos nortes, como el sucedido durante el 18 de diciembre, este evento sucedió en ambos sitios con magnitudes similares, pero ligeramente menores en Campeche, caso contrario, los dos eventos nortes que sucedieron en Yucatán y en Campeche durante marzo y noviembre, las magnitudes registradas en Campeche fueron menores.

Capítulo 4. Discusión

El esquema de corrientes superficiales durante el 2019 obtenidas de los radares de alta frecuencia, sugieren dos regionalizaciones, una frente a Yucatán y otra frente a Campeche. La circulación media fue hacia el oeste frente a Yucatán con velocidades promedio de $\sim 0.20 \text{ m s}^{-1}$, un remolino anticiclónico frente a Sisal durante gran parte del año, esta circulación no pudo ser confirmada a través de productos satelitales debido a la poca profundidad de la zona y a la cercanía de la costa (**Figs. 10 y 12**), sin embargo, instrumentos como del ADCP de Sisal y los radares HF mostraron buen acuerdo. La bifurcación descrita entre Sisal e Isla Arena parece ser un resultado del cambio en la línea de costa sobre la Península de Yucatán y el gradiente de temperatura oceánica, que pudiera dar lugar a bifurcación de las corrientes.

En Yucatán, frente a Telchac los radares HF indicaron un flujo de corrientes en dirección hacia el oeste durante todo el año, ligeramente más intensa durante la primavera y verano debida a la influencia de los vientos alisios, los resultados fueron comparables con los de distintos autores (Martínez y Pares-Sierra, 1998; Zavala-Hidalgo et al., 2003; Enríquez et al., 2010) donde mencionan que la dinámica en la plataforma de Yucatán está asociada con la tensión del viento. Para un mejor entendimiento de cómo el viento afecta a las corrientes superficiales, Ruiz-Castillo et al. (2016) aplicaron un modelo analítico descrito por Pedlosky (2007), del que se logró identificar que las corrientes más intensas hacia el oeste pueden ser explicadas por los altos valores de la tensión del viento (τ_x) a lo largo de la costa y a la estratificación vertical.

Frente a Sisal se identificó la presencia de un remolino anticiclónico durante todo el año, cuya generación pareciera no estar bien definida directamente con el viento, ya que el remolino se mostró durante las diferentes estaciones del viento como lo son los alisios y menormente durante los vientos nortes. Sin embargo, este remolino pudiera ser una consecuencia de la bifurcación de las corrientes sucedidas entre Sisal e Isla Arena, ya que la bifurcación también se mostró durante todo el año con menor intensidad durante los meses de octubre a diciembre, probablemente ocasionados por los vientos nortes.

En Yucatán se encuentra el puerto de Progreso, el cual cuenta con un canal de navegación de 7.4 km (3.9 Millas Náuticas) de longitud y 150 m de ancho, una profundidad de 11.75 metros (NBMI) y un calado oficial de 9.75 metros (PMDP, 2012). El cual tiene efectos sobre las costas adyacentes en relación a la erosión y al oleaje, es claro que los puertos existentes sobre Yucatán retienen sedimento que de manera natural seguirían transportándose hacia el oeste. Esta problemática está enfocada hacia la parte más costera, misma que en este trabajo no se aborda completamente, ya que con la red de radares se estudió (con la mejor configuración de GDOP) desde ~10 km hasta ~220 km fuera de la costa.

De manera general, frente a Yucatán las corrientes se mantienen en dirección hacia el oeste y sin grandes variaciones de dirección e intensidad, mientras que durante el otoño e invierno las corrientes superficiales son afectadas por los eventos nortes. Esta variabilidad fue observada en el análisis de la serie de tiempo (**Fig. 17**) y los mapas sinópticos durante el evento norte en Yucatán (**Fig. 20**) en donde se observaron los cambios abruptos en dirección e intensidad regidos por la intensificación del campo de viento.

Frente a Campeche nuestros resultados mostraron velocidades de las corrientes superficiales de $\sim 0.10 \text{ m s}^{-1}$, que indican corrientes hacia el suroeste durante todo el año. Sin embargo, los radares HF sugieren una bifurcación entre Isla Arena y la ciudad de Campeche ($\sim 20.3^\circ \text{ N}$), en la que una parte de la corriente se dirige hacia el oeste-noroeste y otra se dirige hacia el suroeste. Las corrientes más al sur, frente a Sabancuy, son de menor intensidad con velocidades de $\sim 0.08 \text{ m s}^{-1}$. Kurczyn et al. (2021) utilizan ADCPs Nortek-acoustic wave and current profilers (AWACs) frente a Lerma, Champotón y Chenkan, y sus resultados indicaron un flujo dominante hacia el suroeste, con velocidades de $\sim 0.05 \text{ m s}^{-1}$ en Lerma y Champotón, y valores de $\sim 0.07 \text{ m s}^{-1}$ frente Chenkan, que demuestran la continuación de la circulación en el lado oeste de península, corrientes responsables de traer aguas CSUW (Caribbean Subtropical Under Water) al área de estudio.

La circulación superficial entre Champotón y Sabancuy sigue la línea de costa, con una dirección hacia el suroeste con velocidades de $\sim 0.08 \text{ m s}^{-1}$ durante la primavera y verano, mientras

que durante el invierno y otoños las velocidades son de $\sim 0.17 \text{ m s}^{-1}$ ocasionadas probablemente por los efectos de los vientos nortes y a la orientación de la costa.

Sobre las costas de Campeche, Kurczyn et al. (2021) mencionan que ha habido poco esfuerzo por encontrar el impacto que tienen las surgencias de Yucatán sobre las costas de Campeche. Los autores utilizan datos hidrográficos y trayectorias simuladas en las que muestran por primera vez la presencia de aguas de surgencia sobre la plataforma oeste de la península, y consideran 500 km de viaje de aguas de surgencia en un periodo de 40 días, y obtuvieron velocidades de $\sim 0.14 \text{ m s}^{-1}$, estos valores son comparables en magnitud y dirección con los datos de corrientes superficiales obtenidos con radares HF.

Esta información sirve como soporte a la circulación descrita por los radares HF, en la que se observó que frente a Yucatán la corriente superficial es hacia el oeste, entre Sisal e Isla Arena, hay una dispersión ocasionada por la bifurcación de las corrientes, la circulación que se dirige hacia el suroeste vuelve a bifurcarse entre Isla Arena y la ciudad de Campeche, de forma que una parte se dirige hacia el noroeste y otra hacia el suroeste. Esta dinámica de corrientes superficiales puede explicar el por qué hay presencia de aguas de surgencia de Yucatán frente a Campeche, pero con menor intensidad.

Capítulo 5. Conclusiones

En este trabajo se estudió la circulación superficial durante el año 2019 a partir de datos de medidos con radares de alta frecuencia, se utilizaron varias fuentes de datos como ADCPs, modelación oceánica (HYCOM), y datos satelitales como Viento (ERA5), altura del nivel de mar (Copernicus), temperatura superficial (OSTIA/Copernicus) que funcionaron como complemento en la validación de los datos de radar.

De manera general, los resultados indicaron un flujo dominante hacia el oeste durante todo el año frente a las costas de Telchac con velocidades promedio de $\sim 0.20 \text{ m s}^{-1}$, frente a Sisal se mostró un giro anticiclónico, una bifurcación entre Sisal e Isla Arena donde una corriente se dirige hacia el noroeste y la otra hacia el suroeste. En Campeche como efecto de la bifurcación mencionada, costa afuera una de las corrientes va hacia el noroeste y la otra hacia el suroeste entre Isla Arena y la ciudad de Campeche, la cual pareciera que la corriente costera “serpentea” siguiendo la línea de costa frente a Champotón y Sabancuy con un flujo hacia suroeste. La circulación descrita pudiera explicarse debido a que, en la plataforma oeste de la península de Yucatán, los principales forzamientos son el fondo y el viento, vientos como los alisios que son constantes durante todo el año, las suradas, y los eventos nortes que son intensos con periodos de 3 a 5 días en promedio.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se sugiere que las corrientes superficiales de la zona están influenciadas por el efecto del viento, ya que los datos de los radares HF parecen mostrar una respuesta al comportamiento el viento. Con esto en mente, es factible sugerir que en la plataforma oeste de Yucatán el principal forzante es el viento, cuando la magnitud del viento es casi cero, las corrientes superficiales se mueven de manera inercial y disminuyen su velocidad, hasta que el efecto del viento vuelve a tener una influencia sobre ellas.

Las corrientes superficiales frente a las costas de Yucatán están asociadas a los vientos alisios con dirección hacia el oeste durante la primavera y verano con velocidades máximas de $\sim 0.30 \text{ m s}^{-1}$, así mismo, durante las estaciones mencionadas, los vientos alisios tiene una influencia que favorece fenómenos como la surgencia de Cabo Catoche, en los que se acarrearán aguas del Caribe Mexicano hacia las Costas de Yucatán, las cuales, en conjunto, los vientos alisios, la entrada

de aguas del Caribe y el cambio de orientación de la línea de costa pudieran favorecer la presencia del remolino anticiclónico.

Al oeste de Sisal, en el límite occidental de Yucatán se observó la bifurcación de las corrientes durante casi todo el año, pero principalmente durante primavera y verano, esto sugiere que la bifurcación también está relacionada con el viento, pues durante los vientos alisios es más evidente, mientras que durante los vientos nortes pareciera disminuir su intensidad o incluso desvanecerse.

El promedio de corrientes superficiales indica que frente a Yucatán ($\sim 0.20 \text{ m s}^{-1}$) las velocidades son más intensas que las de Campeche ($\sim 0.10 \text{ m s}^{-1}$). Al ser la conectividad un proceso complejo, no evidente a simple vista o que se de en forma que las magnitudes o direcciones de corrientes superficiales se asemejen o no. La literatura existente menciona que las corrientes de Cabo Catoche con Sisal tienen una buena conexión o están bien conectadas. Entre Sisal y Campeche la conectividad es media, probablemente ocasionadas por la bifurcación que ocurre en el Límite Occidental de Yucatán, y por la respuesta inercial de las corrientes superficiales ocurridas por eventos de vientos nortes.

Frente a Campeche las velocidades fueron menores que en Yucatán, esta diferencia se pudiera explicar debido al cambio de orientación de la costa entre Sisal e Isla Arena, que puede estar ocasionando las bifurcaciones de corrientes entre Isla Arena y la ciudad de Campeche como lo sugiere la **Figura 21**, en las que, al observar el mapa sinóptico, se puede apreciar que la corriente costera “serpentea” siguiendo la forma de la línea de costa. De forma que en el norte de Campeche las corrientes van hacia el sur-oeste como probable influencia de las corrientes costeras de Yucatán, en la región central de Campeche (Lerma-Champotón) las corrientes viran hacia el sur e inclusive sur-este por posible influencia de la costa, y al sur de Campeche (Sabancuy – Ciudad del Carmen) las corrientes se dirigen hacia el oeste siguiendo la forma de la línea de costa.

Los resultados sugieren que los vientos nortes tienen un efecto sobre todo el GoM, sin embargo, el efecto no es homogéneo, sino que tiene afectaciones espaciales sobre el océano. Esto se logró observar en el análisis de los eventos de corta duración, los mapas sinópticos de los eventos

nortes en Yucatán y Campeche demuestran que el principal forzamiento en el área es el viento. Los cambios de dirección del viento ocasionados por los nortes en la plataforma oeste de Yucatán, lograron cambiar la dirección de las corrientes superficiales, esto es una respuesta inercial que trae consecuencias de mezcla al redistribuir propiedades como nutrientes, contaminantes, etc. Esto pudiera formar parte de la explicación sobre la conectividad entre ambas regiones.

Referencias

- Abascal, A., Sheinbaum, J., Candela, J., Ochoa, J., y Badan, A. (2003). Analysis of flow variability in the Yucatan channel. *Journal of Geophysical Research*. <https://doi.org/10.1029/2003JC001922>.
- Candela, J., Ochoa, J., Sheinbaum, J., López, M., Pérez-Brunius, P., Tenreiro, M., y Arriaza-Oliveros, L. (2019). The Flow through the Gulf of Mexico, *J. Phys. Oceanogr.*, 49, 1381–1401. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-18-0189.1>.
- Castellanos, P., Varela, R., y Muller-Karger, F. (2002). Descripción de las áreas de surgencia al sur del Mar Caribe examinadas con el sensor infrarrojo AVHRR. *Mem. Soc. Cien. Nat. La Salle*. 154. 55-76.
- Cetina, P., Candela, J., Sheinbaum, J., Ochoa, J., y Badan, A. (2006). Circulation along the Mexican Caribbean coast. *Journal of Geophysical Research*. 111, C08021. <https://doi.org/10.1029/2005JC003056>.
- Donlon, C. J., Martin, M., Stark, J., Roberts-Jones, J., Fiedler, E., y Wimmer, W. (2012). The Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA) system. *Remote Sensing of the Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.017>.
- Enríquez, C., Mariño-Tapia, I. J., y Herrera-Silveira, J. A. (2010). Dispersion in the Yucatan coastal zone: Implications for red tide events. *Continental Shelf Research*, 30, 127- 137. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.10.005>.
- Enríquez, C., Mariño-Tapia, I., Jeronimo, G., y Capurro-Filigrasso, L. (2013). Thermo-haline processes in a tropical coastal zone. *Continental Shelf Research*. 69, 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.08.018>.
- Estrada-Allis, S., Sheinbaum, J., Azevedo, J., Enríquez, C., Mariño-Tapia, I., y Herrera-Silveira, J. (2020). Dissolved inorganic nitrogen and particulate organic nitrogen budget in the Yucatán shelf: driving mechanisms through a physical–biogeochemical coupled model. *Biogeosciences* 17, 1087–1111. <https://doi.org/10.5194/bg-17-1087-2020>.
- Expósito-Díaz, G., Salas-de-León, D. A., Monreal-Gómez, M. A., Salas-Monreal, D., y Vázquez-Gutiérrez, F. (2009). Corrientes inerciales en el sur del Golfo de México. *Ciencias Marinas* 35(3): 287-296.
- Fernández, D. M., Graber, H. C., Paduan, J. D., y Barrick, D. E. (1997). Mapping Wind Direction with HF Radar. *Oceanography*, 10, 93-95. <https://doi.org/10.5670/oceanog.1997.33>.
- Flores-Vidal, X., y Garcia-Nava, H. (2022). Radares Oceanográficos y corrientes superficiales. *Revista Ciencia y Humanidades* numero 3, octubre de 2022. CONACyT
- Flores-Vidal, X., Flament, P., Durazo, R., Navarro-Olache, L., Álvarez, P., Salles, P., Carrillo, L., Kurczyn, A., Marco, U., Toro, V., y Liera, J. A. (2015). Hacia la creación de una red multinstitucional de radares oceanográficos para la medición de corrientes superficiales en el Golfo de México. *Revista de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco*. Num 1, pp 29-50.
- Gómez-Roa, A., Flores-Vidal, X., Avendaño-Gastelum, O., Núñez, R., Sandoval-Rangel, A., Liera-Grijalva, C. A., y Nieto-Hipólito, J. I. (2020). Long autonomy unmanned aircraft vehicle (UAV) for quick release of ocean mini-drifters. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0178.1>
- González, J. J. (2017). "CIRCULACIÓN SUPERFICIAL EN PLATAFORMA CONTINENTAL Y AGUAS PROFUNDAS DEL GOLFO DE MÉXICO: OCTUBRE-NOVIEMBRE DE 2016" Tesis para obtener el grado de Oceanólogo. Universidad Autónoma de Baja California.
- Gordon, A. L. (1967). Circulation of the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research* 72: 6207-6223. <https://doi.org/10.1029/JZ072i024p06207>.
- Gurgel, K., Essen, H., y Kingsley, S. P. (1999). HF radars: Physical limitations and recent developments. *Costal Engineering*, 37:201–218. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(99\)00026-5](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(99)00026-5).
- Ha, E. C. (1979). Remote Sensing of Ocean Surface Current Shear by HD Backscatter Radar. (Tesis de posdoctorado). Stanford University, Stanford California.
- HYCOM. (2022). HYCOM + NCODA Gulf of Mexico 1/25° Analysis (GOMu0.04/expt_90.1m000). Recopilado de: <https://www.HYCOM.org/data/gomu0pt04/expt-90pt1m000>.
- Jouanno, J., Pallàs-Sanz, E., y Sheinbaum, J. (2018). Variability and dynamics of the Yucatan upwelling: High-resolution simulations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123, 1251—1262. <https://doi.org/10.1002/2017JC013535>.
- Kurczyn, J. A., Appendini, C. M., Beier, E., Sosa-López, A., López-González, J., Posada-Vanegas, G. (2020). Oceanic and atmospheric impact of central American cold surges (Nortes) in the Gulf of Mexico. *Int J Climatol*;1–19. <https://doi.org/10.1002/joc.6779>.

- Kurczyn, J. A., Duran, R., Beier, E., y Souza, A. J. (2021). On the Advection of Upwelled Water on the Western Yucatan Shelf. *Front. Mar. Sci.* 8:723452. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.723452>.
- Lipa, B. J., y Barrick, D. E. (1983). Least-squares methods for the extraction of surface currents from CODAR crossed-loop data: application at ARSLOE. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 8:1–28.
- Martínez-López, B., y Pares-Sierra, A. (1998). Circulation in the gulf of Mexico induced by tides wind and the yucatan current. *Cienc. Mar.* 24, 65–93. <https://doi.org/10.7773/cm.v24i1.740>.
- Merino, I. M. (1997). Upwelling on the Yucatan Shelf: hidrográfico evidence. *Journal of Marine Systems* 13:101-121. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(96\)00123-6](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(96)00123-6).
- Monreal, M. A., y Salas, A. D. (2004). Golfo de México, circulación y productividad. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Morey, S. L., Zavala-Hidalgo, J., y O'Brien, J. J. (2005). The Seasonal Variability of Continental Shelf Circulation in the Northern and Western Gulf of Mexico from a High-Resolution Numerical Model. In *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models* (eds W. Sturges and A. Lugo‐Fernandez). <https://doi.org/10.1029/161GM16>.
- Niller, P., y Paduan, J. (1995). Wind-Driven Motions in the Northeast Pacific as Measured by Lagrangian Drifters. *Journal of Physical Oceanography - J PHYS OCEANOGR.* 25. 2819-2830. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1995\)025<2819:WDMITN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1995)025<2819:WDMITN>2.0.CO;2).
- Paduan, J. D., y Graber, H. C. (1997). Introduction to high-frequency radar: Reality and myth. *Oceanography.* 10, 36-39. <https://doi.org/10.5670/oceanog.1997.18>.
- Pedlosky, J. (2007). The coastal bottom boundary layer: a note on the model of Chapman and Lentz. *J. Phys. Oceanogr.* 37, 2776–2784. <https://doi.org/10.1175/2007JPO3710.1>.
- Pendón, G. (2017). La costa de Huelva: Una introducción a los procesos y productos sedimentarios. Universidad de Huelva. Huelva, España.
- PMDP. (2022). Programa Maestro de Desarrollo Portuario de Progreso y Puestos Pesqueros y Turísticos de Yucatán 2020-2025. Secretaría de Marina.
- Poulain, P., Gerin, R., Mauri, E., y Pennel, R. (2009). Wind Effects on Drogued and Undrogued Drifters in the Eastern Mediterranean. *J. Atmos. Ocean. Tech.* 26: 1144-1156. <https://doi.org/10.1175/2008JTECHO618.1>
- Quirós, E., e Hidalgo, H. (2016). Variabilidad y conexiones climáticas de la zona de convergencia intertropical del Pacífico Este. En: *Tópicos Meteorológicos y oceanográficos*. Ministerio de Ambiente y Energía, Instituto Meteorológico Nacional, Vol. 15, pp 21-36. ISSN: 1409-2034.
- Reyes-Mendoza, O., Mariño-Tapia, I., Herrera-Silveira, J., Ruiz-Martínez, G., Enriquez, C., y Largier, J. L. (2016). The effects of wind on upwelling off Cabo Catoche. *J. Coast. Res.* 32, 638–650. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00043.1>.
- Romero-Centeno, R., Zavala-Hidalgo, J., y Osuna-Cañedo, J. P. (2021). Circulación oceánica y oleaje. En Herzka, S. Z., Zaragoza-Álvarez, R. A., Peters, E. M., y Hernández-Cárdenas, G. (Coord. Gral.). *Atlas de línea base ambiental del golfo de México (tomo II)*, México: Consorcio de Investigación del Golfo de México. Recopilado de: https://atlasigom.cicese.mx/map_data/T002/ATLAS-TOMO-02.pdf.
- Romero, C. (2019). Estudio de la circulación superficial en la Bahía de Todos Santos, Baja California, a través de experimentos con boyas de deriva. Tesis de licenciatura. UABC. Ensenada, Baja California.
- Ruiz-Castillo, E., Gómez-Valdés, J., Sheinbaum, J., y Rioja-Nieto, R. (2016). Wind-driven coastal upwelling and westward circulation in the Yucatan shelf, *Continental Shelf Research*, Volume 118, Pages 63-76. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.02.010>.
- Saavedra-Matta, J. (2017). Corrientes medidas con radio escaterómetros oceanográficos en las costas de Baja California. Tesis de Maestría. UABC. Ensenada, BC.
- Sheinbaum, J., Candela, J., Badan, A., y Ochoa, J. (2002). Flow structure and transport in the Yucatan Channel. *Geophys. Res. Lett.* 29, 1–6. <https://doi.org/10.1029/2001GL013990>.
- Tapanes, J. J. (1971). Pronóstico de los afloramientos costeros y una aplicación al Banco de Campeche. *Geofis. Intl* 11 (3), 127–138.
- Ulanski, S. (2012). La corriente del Golfo: La increíble historia del río que cruza el mar. Turner publicaciones. Madrid, España.
- Zavala-Hidalgo, J., Morey, S. L., y O'Brien, J. J. (2003). Cyclonic Eddies Northeast of the Campeche Bank from Altimetry Data, *Journal of Physical Oceanography*, 33, 623-629. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)033<0623:CENOTC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033<0623:CENOTC>2.0.CO;2).

ANEXO 1

DORIS vs HFR

La **Figura 28** muestra la trayectoria de un derivador DORIS cercana a la costa de Veracruz entre el 6 y el 16 de agosto de 2019, los vectores color azul representan los datos medidos por la DORIS, y los vectores rojos los medidos por los radares HF en la celda más cercana a la trayectoria de la DORIS, así mismo, los vectores color negro muestran la malla de datos medidos con los HFR, y los recuadros color negro indican los datos pertenecientes a la fecha. En la **Figura 29** se muestran las series de tiempo de las componentes zonal (a) y meridional (b) de las velocidades derivadas de la trayectoria de DORIS vs las corrientes extraídas de los radares HF de la celda más cercana a la trayectoria de la DORIS, así como el respectivo coeficiente de correlación. El panel inferior (c) muestra una correlación vectorial entre ambas bases de datos.

De ambas figuras podemos observar tres movimientos dominantes; Durante los días del 06 al 08 de agosto la trayectoria fue hacia el noreste con una variación diurna y velocidades promedio de $\sim 0.18 \text{ m s}^{-1}$. Del 09 al 11 de agosto (indicados con una sección sombreada en la **Fig. 29**) se detectó una zona de calma, con velocidades de $\sim 0.10 \text{ m s}^{-1}$. Posterior al día 11, el derivador sale de la zona de calma, y modificó su trayectoria con valores positivos en las series de tiempo para la componente meridional y negativos para la componente zonal (**Fig. 29**), que resultan en una dirección hacia el noroeste (**Fig. 28**). Este patrón hacia el noroeste, con la zona de calma fue consistente entre el derivador DORIS y los HFR de la costa de Veracruz, además los resultados fueron consistentes con Morey et al. (2005) quienes mencionan que el viento en Veracruz es estacional con dirección dominante hacia el noroeste durante verano, con periodos intermitentes en ausencia de viento.

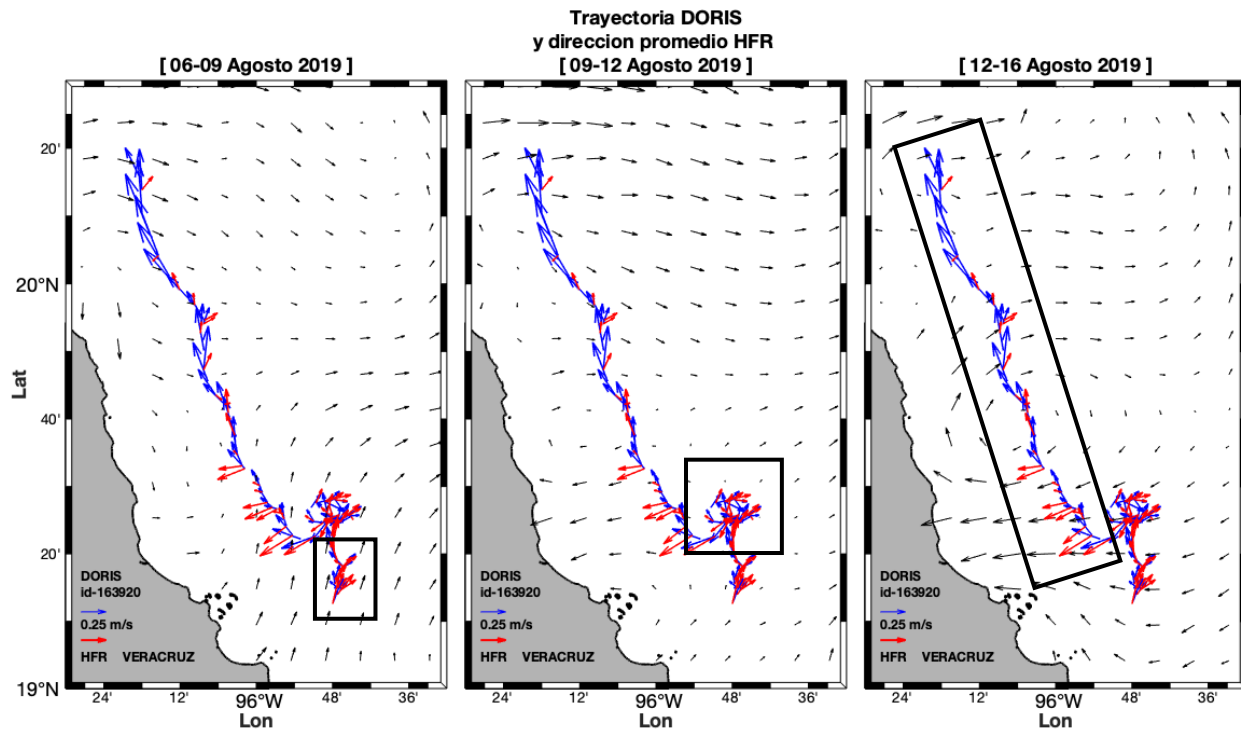


Figura 28. Trayectoria y vectores de velocidad medidas con DORIS (color azul) y velocidades de corrientes extraídas de la celda más cercana a la trayectoria de los HFR (color rojo), así mismo, el esquema de los vectores de velocidad medidas con los radares HF (color negro) promediados del 06 al 09, del 09 al 12 y del 12 al 16 de agosto del 2016, respectivamente, el recuadro (color negro) indica los datos promediados durante el análisis.

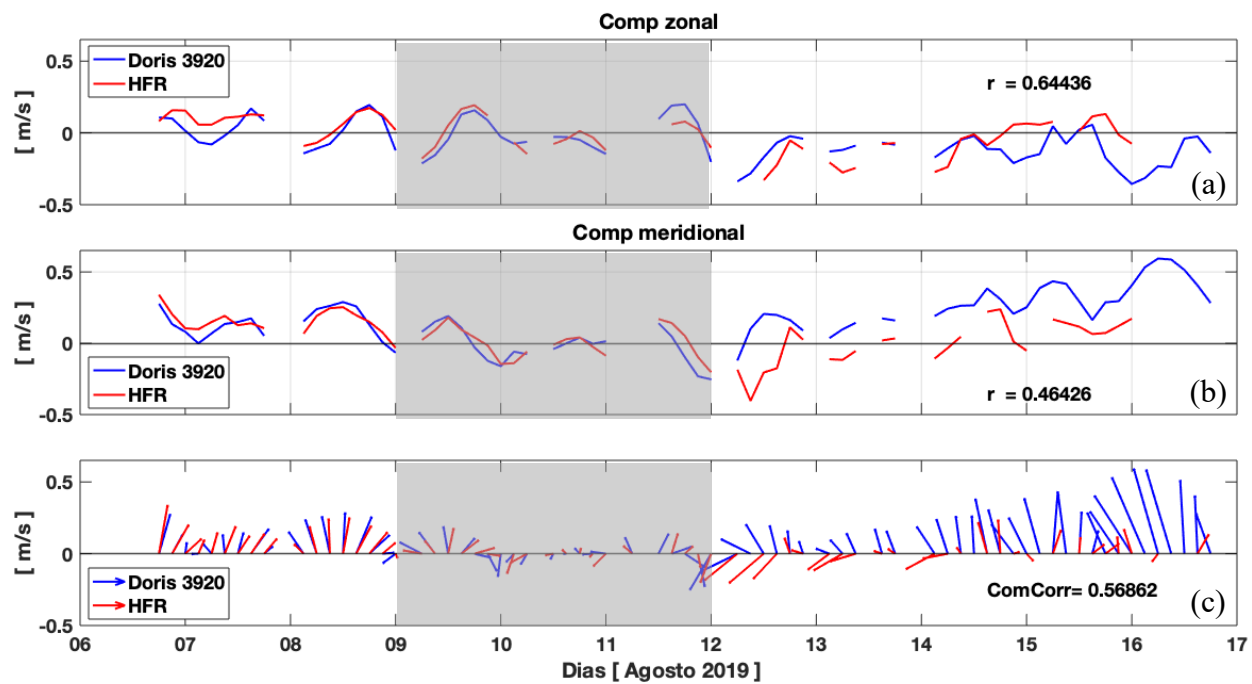


Figura 29. Series de tiempo del DORIS (color azul) y de los HFR (color rojo). a) Valores de la componente zonal, b) Valores de la componente meridional, y b) diagrama de astillas.

ANEXO 2

Se muestra la figura de la batimetría en la Plataforma Costera de Campeche-Yucatán, donde se observó el cambio gradual en la profundidad. La **Figura 30** muestra que la plataforma es somera con $\sim <50$ m de profundidad para las regiones de alcance de los radares HF, y un cambio abrupto de los 100 m hasta más de los 500 m.

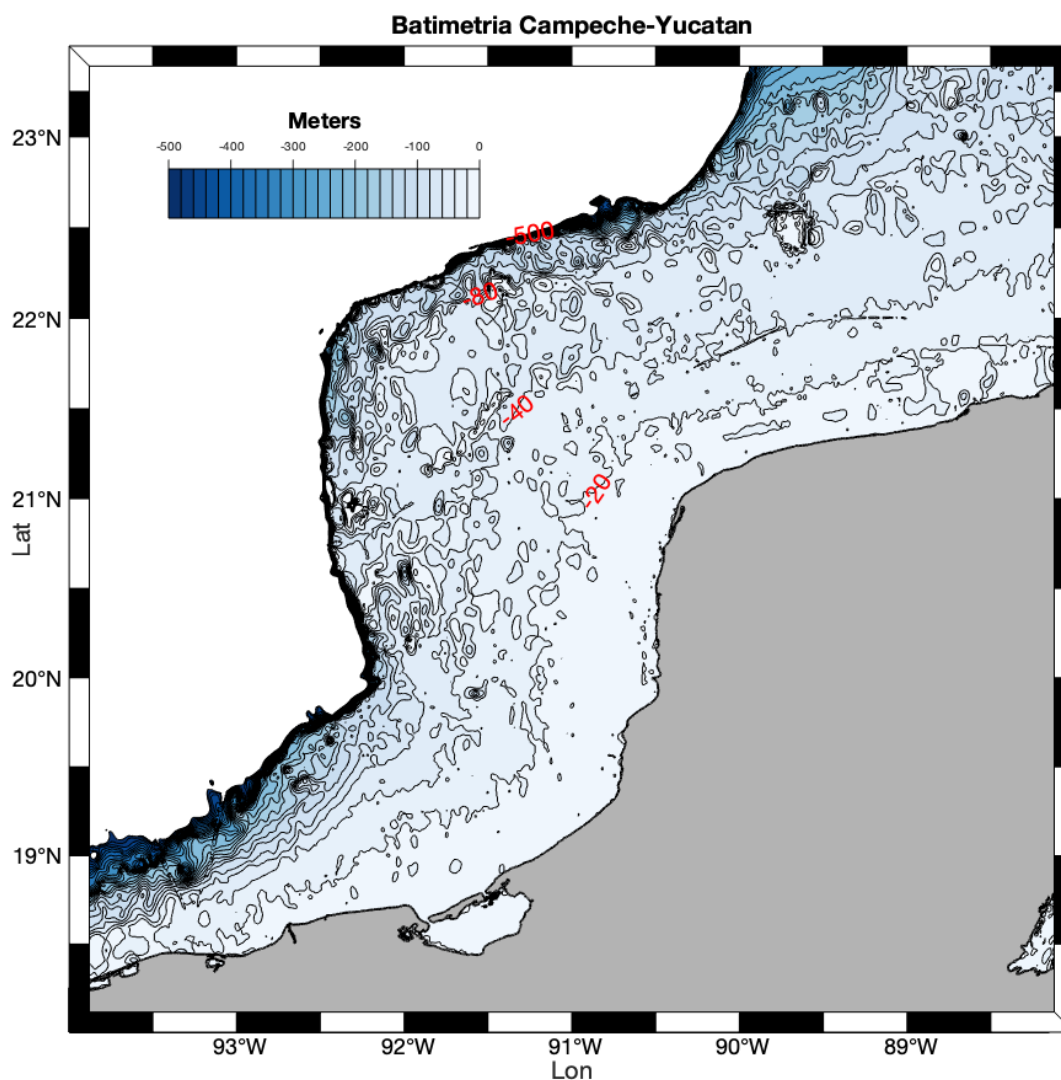


Figura 30. Plataforma continental de Campeche-Yucatán. El gradiente de colores indica la profundidad. Los números en color rojo representan las isobatas de 0 a 500 m de profundidad.